

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta



# DIZERTAČNÁ PRÁCA

**RNDr. Štefan Dušík**

**Magnetopauza: poloha, tvar a štruktúra**

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedúci dizertačnej práce: Prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.

Štúdijný obor: f2 - Fyzika plazmatu a ionizovaných prostředí

Praha 2010



Na tomto mieste by som rád poďakoval vedúcej dizertačnej práce pani Prof. Jane Šaf-ránkovej a pánovi Prof. Zdeňkovi Němečkovi za nesmiernu obetavosť a cenné rady, ktoré mi počas písania práce, ako aj celého štúdia na katedre poskytovali. Poďakovať chcem aj ďalším zamestnancom katedry, ktorých pomoc mala pre mňa veľkú cenu. Za podporu počas dokto-randského štúdia na MFF UK ďakujem tiež rodičom a manželke. Prezentovaná dizertačná práca vznikla na Katedre fyziky povrchů a plazmatu, v poslednej fáze za podpory vedeckého zámeru MSM 0021620860.

Prehlasujem, že som svoju dizertačnú prácu napísal samostatne a výhradne s použitím citovaných prameňov. Súhlasím so zapožičiavaním práce.

V Prahe dňa 17.6.2010

RNDr. Štefan Dušík





## Abstrakt

Názov práce: *Magnetopauza: poloha, tvar a štruktúra*

Autor: *RNDr. Štefan Dušík*

Katedra (ústav): *Katedra fyziky povrchů a plazmatu*

Vedúci dizertačnej práce: *Prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.*

e-mail vedúceho: *jana.safrankova@mff.cuni.cz*

Abstrakt: Pre štúdium interakcie slnečný vietor-magnetosféra je magnetopauza kľúčovou oblasťou. Predpovede jej polohy a znalosť jej štruktúry za širokého rozsahu parametrov sln. vetra je dôležitá pre ďalší pokrok v tejto oblasti. Predkladaná práca sa zaoberá štatistickou štúdiou polohy magnetopauzy ako aj štúdiom jednotlivých prípadov štruktúry magnetopauzy a LLBL. Na základe simultánnych meraní družíc Themis, Geotail, Interball a Magion sme spracovali štúdiu možných zdrojov odchýliek od modelov magnetopauzy vo vysokých aj nízkych geomagnetických šírkach. Zistili sme výraznú deformáciu povrchu magnetopauzy v oblasti kaspu vo vysokých geom. šírkach a závislosť polohy subsolárnej magnetopauzy na "cone" uhle medzipl. magn. poľa. Analýza jednotlivých udalostí prechodu LLBL za použitia tzv. n-T plotov priniesla nové výsledky spojené s mechanizmom formovania LLBL. Zistili sme, že počas severne orientovaného medzipl. magn. poľa, prepojenie siločiar za kaspom vytvorí vonkajšiu podvrstvu LLBL, kým za južnej orientácie poľa táto podvrstva vymizne.

Kľúčové slová: Magnetopauza, LLBL, Magnetické pole, Dynamický tlak, Prepojovanie siločiar

## Abstract

Title: *Magnetopause: location, shape and structure*

Author: *RNDr. Štefan Dušík*

Department: *Department of Surface and Plasma Science*

Supervisor: *Prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.*

Supervisor's e-mail address: *jana.safrankova@mff.cuni.cz*

Abstract: For studies of the solar wind-magnetosphere interaction, the magnetopause is a key region. Prediction of its location and knowledge of its structure in a broad range of upstream parameters are important for further progress on this field. The present thesis deals with statistical investigations of the magnetopause location as well as case studies of the magnetopause and LLBL structure. Based on simultaneous Themis, Geotail, Interball and Magion measurements, we prepared a study of possible sources of the deviations from magnetopause models including low and high latitudes. We found a significant deformation of the magnetopause surface in the cusp region at high latitudes and the dependence of the subsolar magnetopause position on the IMF cone angle. The analysis of several events using so called n-T plots brings new results connected with mechanisms of the LLBL formation. We found that during the northward pointing interplanetary magnetic field, reconnection tailward of the cusp creates the outer part of the LLBL, whereas this sublayer is missing through southward magnetic field.

Keywords: Magnetopause, LLBL, Magnetic field, Dynamic Pressure, Reconnection



# Obsah

<b>Obsah</b>	<b>1</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2 Súčasn� poznatky o problematike</b>	<b>5</b>
2.1 Stručný prehľad zemskej magnetosféry . . . . .	5
2.1.1 S�radnicov� systémy . . . . .	5
2.1.2 Sln��n� vietor a medziplanetárne magnetick� pole . . . . .	6
2.1.3 Prehľad oblastí zemskej magnetosféry . . . . .	8
2.2 Poloha magnetopauzy a jej tvar . . . . .	11
2.2.1 Modely magnetopauzy . . . . .	12
2.3 Dynamika magnetopauzy . . . . .	16
2.4 Vlastnosti LLBL . . . . .	17
2.4.1 Závislosť teploty na koncentrácii častíc . . . . .	17
2.4.2 Prienik častíc a energie do magnetosféry . . . . .	19
<b>3 Cieľ práce</b>	<b>27</b>
<b>4 Zdroje družicových dát</b>	<b>29</b>
4.1 Družice Interball-1 a Magion 4 . . . . .	29
4.1.1 Prístrojové vybavenie . . . . .	30
4.2 Projekt Geotail . . . . .	32
4.2.1 Prístrojové vybavenie . . . . .	32
4.3 Družice Themis A až E . . . . .	33
4.3.1 Prístrojové vybavenie . . . . .	34
4.4 Sln��n� monitor WIND . . . . .	35
4.4.1 Prístrojové vybavenie . . . . .	35
4.5 Sln��n� monitor ACE . . . . .	36
4.5.1 Prístrojové vybavenie . . . . .	37
4.6 Software pre spracovanie a vizualizáciu dát . . . . .	37

<b>5</b>	<b>Štatistická štúdia polohy a tvaru magnetopauzy</b>	<b>39</b>
5.1	Analýza modelov magnetopauzy . . . . .	39
5.1.1	Tvar a poloha magnetopauzy vo vysokých geomagnetických šírkach . . .	42
5.1.2	Tvar a poloha magnetopauzy v nízkych geomagnetických šírkach . . .	43
5.1.3	Prislnečná oblasť v období slnečného minima v rokoch 2007-2008. . .	50
<b>6</b>	<b>Štruktúra a vlastnosti vrstvy LLBL</b>	<b>57</b>
6.1	Identifikácia LLBL . . . . .	57
6.2	Reakcia LLBL na zmeny v slnečnom vetre . . . . .	59
6.3	Závislosť LLBL na IMF $B_Z$ . . . . .	62
6.4	Závislosť LLBL na IMF $B_X$ a IMF $B_Y$ , vplyv fluktuácií v slnečnom vetre . .	66
6.5	Priestorový profil LLBL, použitie viacbodových meraní . . . . .	68
<b>7</b>	<b>Záver</b>	<b>73</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>75</b>
	Prílohy . . . . .	84
A	Často používané skratky . . . . .	85
B	Slovníček pojmov . . . . .	86
C	Priložené články . . . . .	87
	C1 - Safrankova et al. (2002) . . . . .	89
	C2 - Dusik et al. (2003) . . . . .	101
	C3 - Safrankova et al. (2005) . . . . .	111
	C4 - Dusik et al. (2007) . . . . .	119
	C5 - Tkachenko et al. (2010) . . . . .	129
	C6 - Dusik et al. (2010) . . . . .	135

# Kapitola 1

## Úvod

Predmetom dizertačnej práce je štúdium hraničnej vrstvy v nízkych šírkach - skrátené LLBL (z anglického Low-Latitude Boundary Layer). Je to prúdová vrstva na hranici medzi vnútornou a vonkajšou zemskou magnetosférou, ktorú je možné nájsť v prísľečnej ako aj flankovej oblasti v nízkych geomagnetických šírkach. Jej ostrou vonkajšou hranicou je magnetopauza, kde sa vyrovnáva tlak častíc slnečného vetra s tlakom magnetického poľa Zeme. Magnetopauze, ktorej tvar a poloha ovplyvňuje vrstvu LLBL, je v práci venovaná rozsiahla časť.

Práca je rozdelená do 7 kapitol. Prvou kapitolou je tento úvod. V druhej kapitole je v stručnosti načrtnutý súčasný stav študovanej problematiky. Nájdeme tu prehľad oblastí zemskej magnetosféry, prehľad najčastejšie používaných empirických modelov magnetopauzy, bližšie sa kapitola zaoberá dynamikou magnetopauzy, ďalej predstaví štruktúru vrstvy LLBL a popíše spôsoby transportu častíc a energie slnečnej plazmy do zemskej magnetosféry, pričom sa zameria na niektoré fyzikálne súvislosti, ako je napr. vzťah teploty nabitých častíc s ich koncentráciou. Tretia kapitola špecifikuje ciele, ktoré sme si v rámci štúdia LLBL vytýčili. V štvrtej kapitole sú popísané zdroje našich experimentálnych dát, tvorené meraniami prístrojov kozmických družíc z rôznych medzinárodných projektov. Pre štúdium sú použité dáta z rokov 1995 až 1998 a 2007 až 2008. Piata a šiesta, z hľadiska práce kľúčové kapitoly, predstavujú najdôležitejšie výsledky, ku ktorým som dospel štúdiom experimentálnych dát. V siedmej kapitole sú tieto výsledky zhrnuté. Ďalej nasleduje zoznam použitej literatúry, používané skratky, slovníček pojmov a prílohy C1 až C6 tvorené článkami publikovanými v impaktovaných časopisoch, ako aj článkami publikovanými v rámci študentských konferencií WDS (Week of Doctoral Students).

Dizertačná práca vznikla na základe výsledkov postgraduálneho štúdia v rokoch 2002-2010 na KFPP MFF UK v Prahe. Voľne nadviazala na moju diplomovú prácu s názvom *Formovanie magnetosférických hraníc: magnetopauza*, ktorá vznikla na tej istej katedre v rámci magisterského štúdia v rokoch 2000 až 2002.



## Kapitola 2

# Súčasné poznatky o problematike

### 2.1 Stručný prehľad zemskej magnetosféry

#### 2.1.1 Súradnicové systémy

Potreba používania viac ako jedného súradnicového systému vyplýva z faktu, že mnoho fyzikálnych problémov je ľahšie pochopiteľných resp. počítateľných ak sú vyjadrené vo vhodnom súradnicovom systéme. Spoločným rysom súradnicových systémov používaných pri skúmaní kozmického okolia Zeme je práve planéta Zem, ktorá je ich východným bodom. Základným súradnicovým systémom používaným v kozmickej fyzike je systém GSE (z angl. Geocentric Solar Ecliptic). Dôležitým faktorom ovplyvňujúcim javy v okolozemskom prostredí je sklon osy geomagnetického dipólu (odklonenej zhruba o 11 stupňov od rotačnej osy). S týmto sklonom operuje súradnicový systém GSM (Geocentric Solar Magnetic) prevažne používaný v dizertačnej práci.

#### Sústava GSE

Systém GSE má osu  $x$  orientovanú od Zeme smerom k Slnku. Osa  $y$  je zvolená v rovine ekliptiky a smeruje k večernému sektoru (teda proti planetárnemu pohybu). Osa  $z$  je rovnobežná s pólom ekliptiky. Vzhľadom k inerciálnej sústave vykazuje sústava GSE ročnú rotáciu.

V tejto súradnicovej sústave sa zobrazujú napríklad trajektórie družíc, určujú sa zložky medziplanetárneho magnetického poľa, údaje o rýchlosti slnečného vetra a pod.

### Sústava GSM

Systém GSM má podobne ako systém GSE osu  $x$  mieriacu od Zeme k Slnku. Osa  $y$  je definovaná ako kolmica k ose zemského magnetického dipólu tak, že osa dipólu leží v rovine  $x - z$ . Kladný smer osy  $z$  je zvolený súhlasne so smerom severného magnetického pólu. Rozdiel medzi sústavami GSE a GSM je jednoduchá rotácia okolo osy  $x$ .

Systém GSM je vhodný pre zobrazenie vrstiev vonkajšej magnetosféry, polohy magnetopauzy a rázovej vlny, magnetického poľa v prechodovej oblasti a v magnetosférickom chvoste ako aj rýchlosti častíc slnečného vetra v prechodovej oblasti. Orientácia magnetického dipólu totiž mení inak valcovú symetriu toku slnečného vetra. GSM súradnice redukujú 3D pohyb zemského dipólu (v sústave GSE) na pohyb v rovine  $x - z$ . Uhol medzi severným magnetickým pólom a osou  $z$  sústavy GSM sa nazýva sklon dipólovej osy (z angl. dipole tilt angle; tiež tilt uhol) a kladných hodnôt nadobúda, keď je severný magnetický pól sklonený smerom k Slnku. K ročnej perióde spôsobenej pohybom Zeme okolo Slnka tak sústava GSM navyše vykonáva pohyb okolo smeru na Slnko s periódou 24 hodín. Osa  $y$  je kolmá k ose dipólu, preto osa  $y$  leží v rovine magnetického rovníka a pretože je kolmá k spojnici Zem-Slnko, leží na poludníku východ-západ (smeruje na západ).

### 2.1.2 Slnečný vietor a medziplanetárne magnetické pole

#### Slnečný vietor

Slnečný vietor je prúd nabitých častíc vyvrhnutých z vrchnej časti slnečnej atmosféry. Skladá sa prevažne z elektrónov a protónov s energiami okolo 1 keV. Vlastnosti tohoto prúdu častíc, ako je ich rýchlosť či teplota sú premenné v čase.

Kým ranné modely slnečného vetra predpokladali, že primárnou energiou na urýchlenie častíc je termálna energia, počiatkom 60. rokov minulého storočia začalo byť zrejmé, že samotná termálna akcelerácia nemôže byť hlavným zdrojom veľkej rýchlosti slnečného vetra. Za zrýchlením častíc musí byť ešte iný mechanizmus, pravdepodobne súvisiaci s magnetickým poľom v slnečnej atmosfére.

Slnečná koróna je oblasťou plazmy s teplotou cez milión Kelvinov. Výsledkom termálnej kolízie majú častice vo vnútornej koróne maxwellovské rozdelenie rýchlostí so strednou hodnotou asi 455 km/s. Táto rýchlosť je však ďaleko pod únikovou rýchlosťou 618 km/s. Napriek tomu, niektoré častice z chvosta rozdeľovacej funkcie majú dosť energie na to, aby dosiahli rýchlosť 400 km/s a stali sa súčasťou slnečného vetra. Pri rovnakých teplotách získajú elektróny (vďaka ich omnoho menšej hmotnosti) únikovú rýchlosť pričom vytvárajú elektrické pole, ktoré ďalej urýchľuje ióny preč zo Slnka (Encarnaz et al., 2003).

Celkový počet častíc odvádzaných zo Slnka vo forme slnečného vetra je asi  $1,3 \cdot 10^{36}$  za sekundu. Z toho plynie celková strata hmoty asi 6,7 miliardy ton za hodinu. To je ekvivalent straty hmoty planéty Zeme každých 150 miliónov rokov. Napriek tomu, Slnko stratilo vďaka slnečnému vetru len asi 0,01 % svojej hmotnosti.



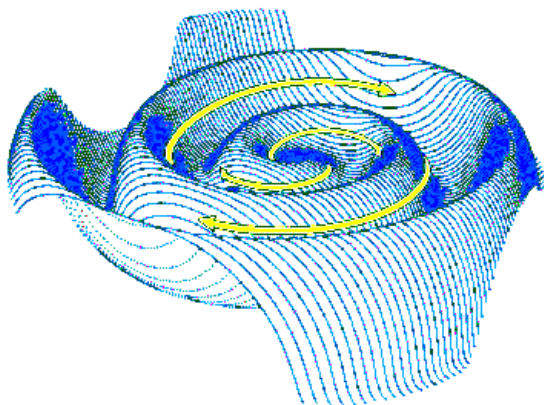
Slnčný vietor má dve komponenty označované ako pomalý a rýchly slnečný vietor. Pomalý slnečný vietor má rýchlosť okolo 400 km/s, teplotu  $1,4 - 1,6 \cdot 10^5$  K a zloženie ktoré je podobné zloženiu koróny. Naproti tomu rýchly slnečný vietor má typickú rýchlosť okolo 750 km/s a teplotu okolo  $8 \cdot 10^5$  K a zloženie podobné slnečnej fotosfére. Pomalý slnečný vietor je zhruba dvojnásobne hustší ako rýchly, pričom má komplexnejšiu štruktúru s turbulentnými oblasťami a veľkorozmerovými útvarmi.

Oba typy slnečného vetra môžu byť prerušené veľkými, rýchlo sa pohybujúcimi výronmi plazmy nazvanými CME (Coronal Mass Ejections). CME sú v médiách často nazývané ako slnečné búrky.

V prípade, že CME dosiahne zemskú magnetosféru, dôjde k dočasnej deformácii zemského magnetického poľa a indukcií veľkých prúdov v Zemi. Tento jav sa nazýva geomagnetickou búrkou pričom ide o globálnu udalosť. Dopady CME môžu vyvolať prepojenie magnetických siločiar v časti magnetického chvostu Zeme (Earth's magnetotail - nočná časť zemskej magnetosféry), čo vyvolá prúd elektrónov a protónov smerom k zemskej atmosfére a umožní sformovanie polárnej žiary.

### Medziplanetárne magnetické pole

Slnko má silné magnetické pole, ktoré má hodnotu približne  $10^{-4}$  T, lokálne pole slnečných škvrín dosahuje až do  $10^{-1}$  T. Väčšina útvarov na jeho povrchu s týmto poľom súvisí. Slnko je magneticky premenná hviezda, polarita jeho pólův a orientácia jeho siločiar se mení v rámci 11 ročného slnečného cyklu. V maxime slnečného cyklu je magnetické pole Slnka veľmi zložitá a dá sa vnímať zastúpený dvojpólový moment. Siločiar sú vplyvom rotácie Slnka tvarované do podoby tzv. Archimedových špirál, čo má za následok, že obiehajúce telesá okolo Slnka prechádzajú striedavo oblasťami s rozdielnymi smermi magnetického poľa.



Obr. 2.1: Schematický náčrtok Parkerovej špirály.

Parkerova špirála (obrázok 2.1) je tvarom slnečného magnetického poľa prechádzajúceho Slnečnou sústavou. Vplyv slnečného magnetického poľa na slnečný vietor vytvára najväčšiu štruktúru v Slnečnej sústave - heliosférickú prúdovú vrstvu. Slnečný vietor ovplyvňovaný tvarom Parkerovej špirály ovplyvňuje tvar slnečného magnetického poľa vo vonkajšej časti Slnečnej sústavy. Za hranicou 10 až 20 AU (Astronomical unit - stredná vzdialenosť Zem-Slnko) je magnetické pole skoro toroidné (brané z pohľadu slnečného rovníka) namiesto poloidného (brané zo smeru severného na južné pole, ako u tyčového magnetu), či radiálneho (brané smerom z vonku či vnútra sústavy, ako by sa očakávalo z toku slnečného vetra ak by Slnko nerotovalo). Špirálový tvar zároveň výrazne zosilňuje magnetické pole vo vonkajších častiach Slnečnej sústavy.

### 2.1.3 Prehľad oblastí zemskej magnetosféry

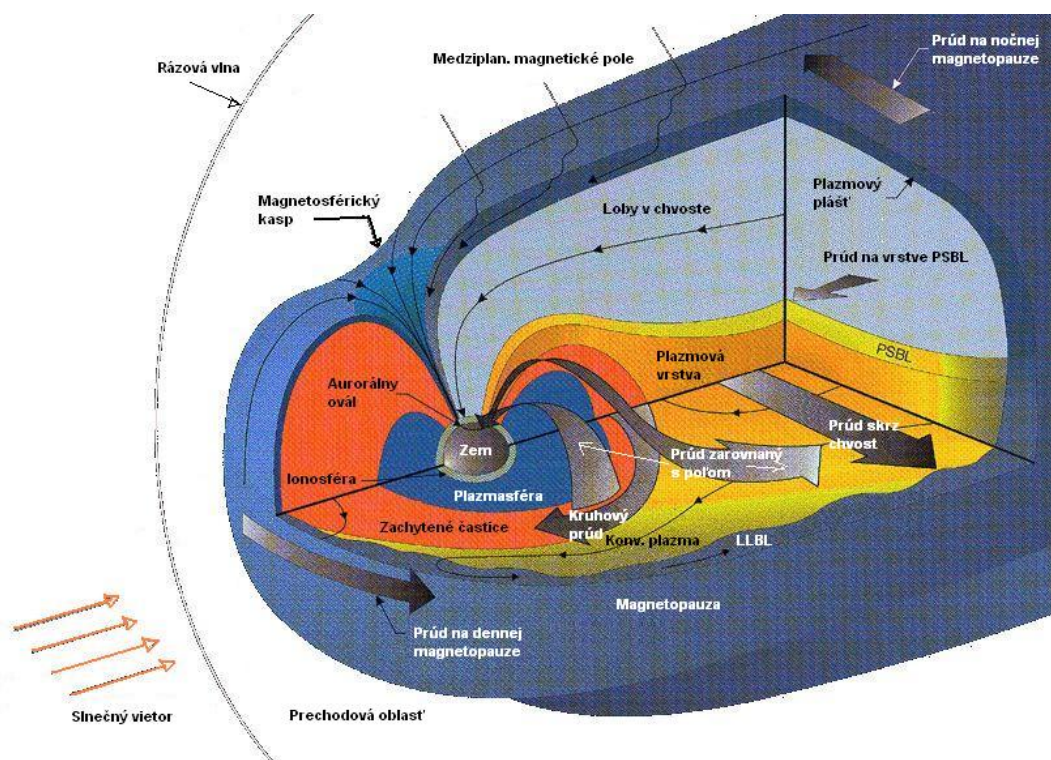
Planéta Zem má vlastné magnetické pole, ktoré tvorí prirodzenú prekážku v pohybe nabítených častíc slnečného vetra. Veľkosť tohoto magnetického poľa je na zemskom povrchu okolo  $30 \cdot 10^3$  nT, vo vzdialenosti 10 zemských polomerov od stredu Zeme sú to desiatky nT. V prvom priblížení má tvar magnetického poľa Zeme dipólový charakter. Neustály tok častíc slnečného vetra však toto pole deformuje do pretiahnutého tvaru tiahnuceho sa stovky zemských polomerov od planéty všeobecne nazývaného magnetosféra. Jej vlastnosti nie sú homogénne, je tvorená mnohými vrstvami s odlišnými vlastnosťami, ktoré sú predmetom výskumu. Schematický náčrtok oblastí zemskej magnetosféry je na obrázku 2.2.

#### Rázová vlna

Rázová vlna (bow shock) je prvou štruktúrou, ktorú častice slnečného vetra na ceste k Zemi vytvárajú. Častice sú spomaľované zo supersonických na subsonické rýchlosti (rýchlosť šírenia častíc slnečného vetra (okolo 400 km/s) je vyššia ako rýchlosť, ktorou sa môžu šíriť "zvukové" vlny smerom k Slnku (v riedkom okolozemskom prostredí okolo 40 km/s)), vzniká čelná rázová vlna s hrúbkou okolo 100 km. Okrem poklesu rýchlosti častíc dochádza k nárastu teploty, tlaku a koncentrácie častíc. Čelo rázovej vlny sa pohybuje v závislosti na parametroch slnečného vetra. Pre určenie tvaru a polohy rázovej vlny bolo vyvinutých v priebehu rokov mnoho modelov (napr. Formisano (1979), Nemecek and Safrankova (1991), Peredo et al. (1995), Jerab et al. (2005)). Najjednoduchším modelom rázovej vlny je časť rotačného elipsoidu vyjadreného v GSE súradniciach vzťahom

$$y = \frac{10,4}{\sqrt{nv^2}} \cdot \sqrt{520 - 0,4x^2 - 42x}, \quad (2.1)$$

kde  $x$  je poloha  $X_{GSE} \in \langle -10R_E; 12R_E \rangle$ ,  $v$  je rýchlosť častíc slnečného vetra v km/s a  $n$  je koncentrácia častíc v  $cm^{-3}$ .



Obr. 2.2: Schematický prehľad oblastí zemskej magnetosféry.

### Prechodová oblasť

Prechodová oblasť (magnetosheath) je vrstva medzi rázovou vlnou a zemskou magnetosférou. Častice vo vnútri tejto vrstvy obtekajú zemskú magnetosféru, pričom sú ďalej spomaľované a zahrievané. Pravidelne usporiadané zemské magnetické pole v tejto oblasti slabne a vďaka interakcii s časticami slnečného vetra je deformovanejšie. Magnetické pole v prechodovej oblasti nie je schopné plne vychyľovať nabité častice slnečného vetra preč od magnetosféry. Koncentrácia častíc v prechodovej oblasti je nižšia ako pred rázovou vlnou, no väčšia ako vo vnútornej oblasti za magnetopauzou.

Prechodová oblasť je turbulentným regiónom, ktorého formovanie je možné chápať ako interakciu magnetosféry so slnečným vetrom za pomoci vln. Tieto vlny prinášajú informáciu slnečnému vetru o existencii prekážky, ktorou je magnetosféra. Vlny nadobúdajú rozličný charakter, ako stojaté vlnenie, diskontinuity, oscilácie atď. Za účelom identifikovania rozličných zdrojov fluktuácií pozorovaných družicami prelietavajúcimi touto oblasťou vzniklo mnoho štúdií. Môžeme spomenúť Spreiter et al. (1966), ktorý predstavil gas-dynamický model toku plazmy v prechodovej oblasti, Zwan and Wolf (1976) predpovedali existenciu vrstvy vyčerpania (Depletion Layer) v prechodovej oblasti v blízkosti magnetopauzy, Song et al. (1990b) a Southwood and Kivelson (1992) objavili regióny so zvýšenou koncentráciou častíc v blízkosti magnetopauzy. Seon et al. (1999) vysvetľuje fluktuácie v koncentrácii častíc exis-

tenciou stojatých vln v blízkosti magnetopauzy a prúdením pomalých vln generovaných na rázovej vlně. Nízko-frekvenčnými variáciami iónového toku v prechodovej oblasti sa zaoberal Nemecek et al. (2002b).

### Magnetopauza

Magnetopauza (magnetopause) je hranica, kde sa vyrovnáva tlak slnečného vetra s magnetickým tlakom, ktorého zdrojom je magnetosféra. Rovnováhu tlakov je možné vyjadriť pomocou vzťahu

$$\left(\frac{B^2}{2\mu_0} + p\right)_d = \left(\frac{B^2}{2\mu_0} + p\right)_u \quad (2.2)$$

kde indexy  $d$  a  $u$  (pôvodne z anglického downstream a upstream) predstavujú oblasť v magnetosfére a v prechodovej oblasti,  $B$  je magnetické pole,  $p$  je tlak plazmy slnečného vetra a  $\mu_0$  je permeabilita vákuua. Vzťah 2.2 sa ďalej zjednodušuje: magnetický tlak  $\frac{B^2}{2\mu_0}$  sa zanedbáva v oblasti nad magnetopauzou v smere slnečného vetra a dynamický tlak  $p$  sa zanedbáva vo vnútri magnetopauzy. Výsledný vzťah teda bude

$$(p)_u = \left(\frac{B^2}{2\mu_0}\right)_d. \quad (2.3)$$

Táto aproximácia môže byť použitá len v určitých prípadoch vzhľadom k tomu, že hodnota tlaku  $p$  vo vnútornej oblasti magnetopauzy nemusí byť vždy zanedbateľná. Vzťah 2.3 nemôže byť taktiež použitý pre magnetosférické kasy a v chvostovej oblasti.

### Magnetosférické kasy

Statické modely magnetosféry predpovedajú existenciu dvoch neutrálnych bodov na magnetopauze, v ktorých je veľkosť magnetického poľa nulová. Tieto body sú s povrchom Zeme spojené magnetickými siločiarami v oblasti približne  $\pm 78^\circ$  magnetickej šírky. Keďže tieto body spájajú zemský povrch s prechodovou oblasťou, majú veľmi dôležitú úlohu pre častice slnečného vetra, ktoré tade môžu prenikať do magnetosféry a to bez nutnosti pohybu naprieč magnetickými siločiarami (viď napr. Merka (2000)).

### Hraničná vrstva v nízkych šírkach

Hraničná vrstva v nízkych šírkach (z anglického Low-Latitude Boundary Layer, ďalej LLBL) bola prvý krát identifikovaná družicou IMP 6 pred takmer 35 rokmi (Eastman et al., 1976). LLBL je definovaná ako oblasť, kde je možné nájsť plazmu z prechodovej oblasti na vnútornej strane prúdovej vrstvy magnetopauzy a to v nízkych geomagnetických šírkach. Prítomnosť tejto vrstvy bola preukázaná pre takmer všetky lokálne časy pozdĺž dennej magnetopauzy až po chvostové oblasti flankov (Eastman et al., 1976). Ukázalo sa, že LLBL leží ako na uzavorených siločiarach magnetického poľa, tak aj na otvorených siločiarach, kde jeden koniec

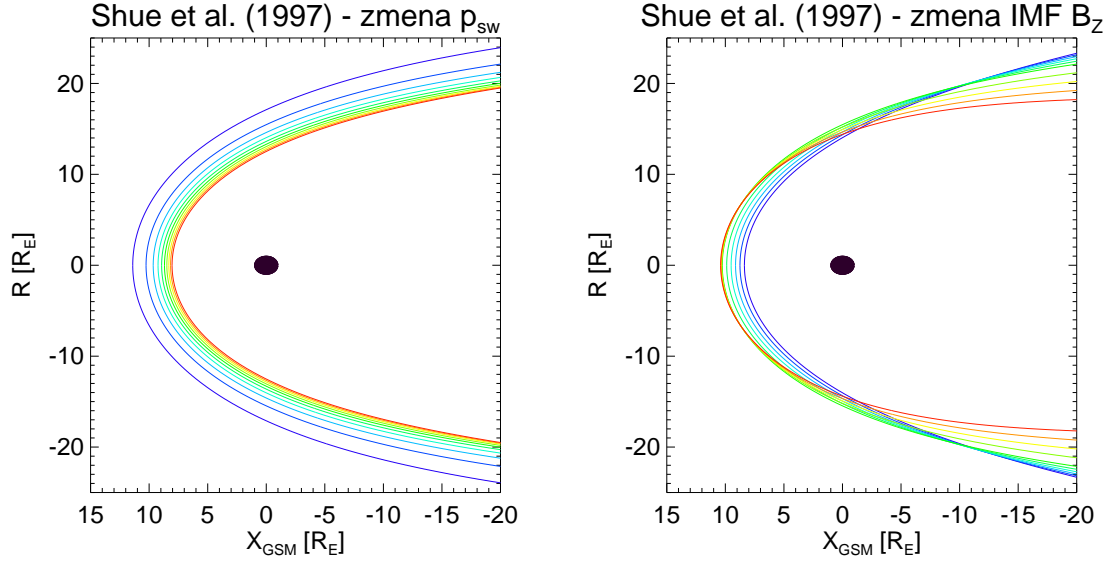
siločiar leží v ionosfére a druhý pokračuje do prechodovej oblasti. Hlavnú úlohu pri formovaní uzatvorených a otvorených siločiar má orientácia medziplanetárneho magnetického poľa IMF a prepojšovanie magnetických siločiar.

### Plazmová vrstva

Plazmová vrstva (z angl. *plasma sheet*) je oblasť ležiaca na uzatvorených siločiarach magnetického poľa. Typicky sa delí na centrálnu plazmovú vrstvu a hraničnú vrstvu PSBL (z angl. *Plasma Sheet Boundary Layer*), ktorá leží vo vyšších geomagnetických šírkach v susedstve magnetických lbov. Plazmová vrstva obsahuje horúce častice s energiami rádovo v keV. Koncentrácia častíc býva v rozmedzí  $0,4$  až  $2\text{ cm}^{-3}$ , pričom koreluje s koncentráciou častíc v slnečnom vetre. Tento fakt spolu so skutočnosťou, že počas nízkej geomagnetickej aktivity dominuje ión  $H^+$  naznačuje, že slnečný vietor je aspoň z časti zdrojom plazmy v plazmovej vrstve. Teplota iónov je tu približne 7x vyššia, ako teplota elektrónov (Baumjohann et al., 1989). Plazmová vrstva je od chvostových lbov oddelená hraničnou vrstvou PSBL, ktorá s najväčšou pravdepodobnosťou leží na uzatvorených siločiarach. Koncentrácia častíc v PSBL je o niečo menšia, ako v centrálnej oblasti plazmovej vrstvy (Eastman et al., 1984).

## 2.2 Poloha magnetopauzy a jej tvar

Hlavným faktorom ovplyvňujúcim tvar a polohu magnetopauzy, ako aj jej dynamiku je medziplanetárne magnetické pole IMF. Prvé štúdie zaoberajúce sa magnetopauzou sa koncentrovali najmä na vplyv dynamického tlaku slnečného vetra. Fairfield (1971) ukázal, že zmeny v dynamickom tlaku dostatočne objasňujú väčšinu pohybu magnetopauzy v časových škálach niekoľkých hodín, či dlhších. Ak sa veľkosť dynamického tlaku zvýši, magnetopauza sa pohybuje smerom k Zemi, pri znížení tlaku sa zase pohybuje smerom od Zeme (viď. ľavý panel obr.2.3). Ďalšie štúdie však ukázali podstatný vplyv IMF - prislnečná magnetopauza sa pohybuje smerom k Zemi v prípade záporného IMF (Holzer and Slavin, 1978) (viď. pravá strana obr.2.3). Petrínek et al. (1991) ukázali, že poloha magnetopauzy je lepšie korelovaná s veľkosťou dynamického tlaku slnečného vetra v prípade severnej orientácie IMF. Petrínek and Russell (1993) mapovali prechody magnetopauzou pre silne severne a silne južne orientované IMF. Zistili, že vzdialenosť subsolárneho bodu klesá s južnejším IMF, no zostáva skoro nezmenená pri severnom IMF. Roelof and Sibeck (1993) potvrdili, že pre IMF južné je denná magnetopauza bližšie k Zemi, kým flanková magnetopauza sa pohybuje ďalej od Zeme a zväčšuje sa jej rozovretie. Tento jav je podľa ich štúdie zreteľnejší pre nízke hodnoty dynamického tlaku, kde sa viac prejavuje závislosť na IMF, pričom ide o principiálne rozdielne procesy pre rôzne orientácie IMF. Na druhej strane, čím vyššie hodnoty dynamického tlaku, tým menšia závislosť polohy a tvaru magnetopauzy na IMF.



Obr. 2.3: Model magnetopauzy Shue et al. (1997). Na ľavom panele je závislosť polohy magnetopauzy na dynamickom tlaku sln. vetra  $p_{sw}$  v hodnotách 1 (krajná tmavomodrá krivka) až 10 nPa (krajná červená krivka). Pravý panel ukazuje závislosť polohy a tvaru magnetopauzy na veľkosti a orientácii IMF od -15 nT (tmavomodrá krivka) až po +15 nT (červená krivka).

### 2.2.1 Modely magnetopauzy

V snahe čo najlepšie vystihnúť tvar a polohu magnetopauzy vzniklo v priebehu rokov niekoľko empirických modelov, ktoré na základe parametrov slnečného vetra predpovedajú tvar a polohu magnetopauzy.

#### Formisano et al. (1979)

Tento model je trojrozmernou plochou druhého rádu, ktorá reprezentuje magnetopauzu za priemerných podmienok v slnečnom vetre počas rokov 1972-1973 (koncentrácia častíc  $9,4 \text{ cm}^{-3}$ , rýchlosť slnečného vetra  $450 \text{ km s}^{-1}$ ). Jediným vstupným parametrom modelu je veľkosť dynamického tlaku slnečného vetra. Tento parameter neudáva tvar plochy (ten je pevne daný), určuje len jej veľkosť. Na určenie vzdialenosti modelovej magnetopauzy od Zeme model používa polárne súradnice, pričom  $\Theta$  je uhol zovretý polohovým vektorom družice s osou  $x$ . Ak priesečník spojnice družica-Zem pod daným uhlom  $\Theta$  s plochou

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + a_{12}xy + a_{14}x + a_{24}y + a_{44} = 0 \quad (2.4)$$

má veľkosť  $R_{mv}(\Theta)$ , potom je vzdialenosť  $R_{mod}(\Theta)$  magnetopauzy od Zeme pod týmto uhlom

$$R_{mod}(\Theta) = \frac{R_{mv}(\Theta)}{R_{m0}} \frac{100}{R_{m0} \sqrt[6]{N v_{sw}^2}}, \quad (2.5)$$

pričom  $R_{m0}$  značí vzdialenosť vrcholu od Zeme ( $8.81 R_E$ ). Konštanty v 2.4 sú nasledovné:  $a_{11} = 0,53$ ,  $a_{22} = 1$ ,  $a_{33} = 1,05$ ,  $a_{12} = 0,11$ ,  $a_{14} = 17,8$ ,  $a_{24} = -1,3$ ,  $a_{44} = -198$ .

### Sibeck et al. (1991)

Magnetopauza je v prípade tohoto modelu reprezentovaná tvarom rotačného elipsoidu. Vstupným parametrom je z-tová zložka IMF a veľkosť dyn. tlaku slnečného vetra  $p_{sw}$ . Povrch magnetopauzy je daný vzťahom  $g = R^2 + Ax^2 + Bx + C$ . Konštanty  $A$ ,  $B$  a  $C$  boli zistené fitovaním, ktoré bolo prevedené iteratívne, so snahou minimalizovať sumu štvorcov  $\sum (g_i / \nabla g_i)^2$  pre šesť skupín rozsahov hodnôt IMF  $B_z$ . Pre každú skupinu bola vypočítaná sada koeficientov  $A$ ,  $B$  a  $C$ . Konkrétne rozdelenia do skupín s vypočítanými koeficientami sú uvedené v tabuľke 2.1.

Rozsah IMF $B_z$ [nT]	$A_0$	$B_0$	$C_0$	$\sigma [R_E]$
$-6 < B_z < -4$	0,12	19,9	-200,6	1,9
$-4 < B_z < -2$	0,22	18,2	-213,4	1,9
$-2 < B_z < 0$	0,11	17,9	-212,8	1,9
$0 < B_z < 2$	0,20	17,1	-221,5	1,9
$2 < B_z < 4$	0,09	15,7	-198,3	2,0
$4 < B_z < 6$	0,13	13,1	-179,2	2,4

Tab. 2.1: Koeficienty plochy  $R^2 + ax^2 + Bx + C = 0$  získané metódou najmenších štvorcov pre šesť rozsahov hodnôt IMF  $B_z$  (Sibeck et al., 1991).

Tvar magnetopauzy je finálne vyjadrený ako

$$R^2 + A_0 x^2 + B_0 (p_{sw0}/p_{sw})^{1/6} x + C_0 (p_{sw0}/p_{sw})^{1/3} = 0, \quad (2.6)$$

kde  $p_{sw}$  je dynamický tlak slnečného vetra,  $p_{sw0}$  je normálny tlak slnečného vetra s hodnotou 2,04 nPa. Platnosť modelu je ohraničená na dynamické tlaky v rozsahu  $0,54 \text{ nPa} < p_{sw} < 9,90 \text{ nPa}$  a IMF  $B_z$  v rozsahu  $-6 \text{ nT} < B_z < 6 \text{ nT}$ .

### Roelof and Sibeck (1993)

Modelová plocha popisujúca magnetopauzu je rotačný elipsoid. Vstupnými parametrami sú dynamický tlak  $p_{sw}$  a z-tová zložka IMF. Model používa jedno funkčné vyjadrenie pre obidve polaritu IMF  $B_z$ .

Poloha magnetopauzy je určená výrazom:

$$\rho(x) = \sqrt{-e^a x^2 - e^b + e^c}, \quad (2.7)$$

pričom

$$a = -1,764 - 0,299p_1 - 0,151b_1 - 0,246p_1 + 0,05p_1b_1 + 0,476b_1^2,$$

$$\begin{aligned}
b &= 2,934 - 0,076p_1 - 0,129b_1 - 0,012p_1^2 + 0,079p_1b_1 + 0,0026b_1^2, \\
c &= 5,379 - 0,183p_1 - 0,041b_1 - 0,044p_1^2 + 0,04p_1b_1 + 0,02b_1^2, \\
p_1 &= \log_2\left(\frac{p_{sw}}{2}\right), \\
b_1 &= \frac{B_z}{3,5}.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Platnosť modelu je ohraničená na tlaky v rozsahu  $0,5 \text{ nPa} < p_{sw} < 8,0 \text{ nPa}$  a polia v rozsahu  $-5 \text{ nT} < B_z < 5 \text{ nT}$ . Mimo týchto rozsahov je model menej presný (Petrinec and Russell, 1997).

### Kuznetsov and Suvorova (1996)

Pre určenie tvaru a polohy magnetopauzy model používa dva paraboloidy pretínajúce sa pre  $\Theta \approx 30^\circ$ , pričom  $\Theta$  je uhol medzi osou  $X_{GSM}$  a rádius-vektorom pozorovaného prechodu. Fity sú vypočítané pre dve orientácie IMF  $B_z$ .

Poloha  $\rho$  magnetopauzy pre dané  $x$  je menšou z hodnôt  $\rho_1$  a  $\rho_2$  zo vzťahov:

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{x - x_0}{g_0}}, \tag{2.9}$$

$$\rho_2 = \sqrt{\frac{x - x'}{g'}}. \tag{2.10}$$

Pre  $B_z > 0$  sú konštanty  $x_0, x', g_0, g'$  počítané ako

$$\begin{aligned}
x_0^+(p) &= \frac{12,10}{p_{sw}^{0,19}}, \\
g_0^+(p) &= -0,4371 \left(1 - e^{\frac{-p_{sw}}{2,71}}\right), \\
x'^+(p) &= \frac{13,86}{p_{sw}^{0,20}} \quad \text{pre } p_{sw} < 4 \text{ nPa}, \\
x'^+(p) &= \frac{12,39}{p_{sw}^{0,167}} \quad \text{pre } 4 < p_{sw} < 26 \text{ nPa}, \\
g'^+(p) &= -0,053 - 0,00205p_{sw} \quad \text{pre } p_{sw} < 4 \text{ nPa}, \\
g'^+(p) &= -0,06484 (1 - e^{-p_{sw}}) \quad \text{pre } 4 < p_{sw} < 26 \text{ nPa}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

a pre  $B_z < 0$

$$\begin{aligned}
x_0^-(p) &= x_0^+ - 0,058 |B_z|^{1,93} p_{sw}^{-0,343}, \\
g_0^-(p) &= g_0^+ - 0,02086 |B_z|^{-0,296} p_{sw}^{0,156}, \\
x'^-(p) &= x'^+ - 0,689 |B_z|^{1,09} p_{sw}^{-0,377}, \\
g'^-(p) &= g'^+ - 4,110^{-3} |B_z|^{0,766} p_{sw}^{-0,234}.
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Model je najpresnejší pre dynamické tlaky od  $3 \text{ nPa}$  do  $25 \text{ nPa}$  a mal by poskytovať spoľahlivé predpovede tiež pre extrémne hodnoty IMF väčšie ako  $20 \text{ nT}$  (resp. menšie ako  $-20 \text{ nT}$ ). V x-ovej súradnici je platnosť modelu ohraničená na  $-10 R_E < x < 12 R_E$ .



**Petrinec and Russell (1996)**

Tvar a poloha magnetopauzy je v tomto prípade počítaná zvlášť pre dennú a nočnú stranu. Vstupnými parametrami sú dynamický tlak  $p_{sw}$  a IMF  $B_z$ . Funkčné formy používajú rozdielne hodnoty koeficientov  $m_1$  a  $m_2$  pre rozdielne orientácie poľa (viď rovnice 2.13 a 2.14). Pre  $x > 0$  je v polárnych súradniciach

$$r(\Theta) = \frac{\frac{14,63}{\sqrt[6]{\frac{p_{sw}}{2,1}}}}{1 + \left(-1 + \frac{14,63}{10,3 + m_1 B_z}\right) \cos \Theta}, \quad (2.13)$$

pričom  $m_1 = 0$  pre  $B_z \geq 0$  a  $m_1 = 0,16$  pre  $B_z \leq 0$ . Pre  $x$  záporné sa závislosť mení na

$$\rho(x) = \frac{-2}{0,085} \left[ \arcsin \sqrt{\frac{2,98 e^{0,085x} (0,152 + m_2 B_z)}{p_{sw}^{0,524}}} - \arcsin \sqrt{\frac{2,98 (0,152 + m_2 B_z)}{p_{sw}^{0,524}}} \right] + \frac{14,63}{\sqrt[6]{p_{sw}/2,1}}, \quad (2.14)$$

kde  $m_2 = -0,00137$  pre severnú orientáciu IMF  $B_z$  a  $m_2 = -0,00644$  pre IMF  $B_z$  južné. Spoľahlivé predpovede by mal model dávať pre IMF  $B_z$  v rozsahu od -6 nT do 6 nT a pre dynamické tlaky od 0,1 nPa do 6 nPa.

**Shue et al. (1997)**

Tento model má opäť 2 vstupné parametre  $p_{sw}$  a IMF  $B_z$ . Pre popis magnetopauzy používa funkčnú formu v tvare

$$r(\Theta) = r_0 \left( \frac{2}{1 + \cos \Theta} \right)^\alpha, \quad (2.15)$$

kde  $\alpha$  je tzv. tail flaring (otvorenie magnetopauzy na nočnej strane) a  $r_0$  je vzdialenosť subsolárneho bodu. Pre  $\alpha$  a  $r_0$  ďalej platí

$$\alpha = (0,58 - 0,01 B_z)(1 + 0,01 p_{sw}), \quad (2.16)$$

$$r_0 = \frac{11,4 + m_1 B_z}{\sqrt[6,6]{p_{sw}}}, \quad (2.17)$$

pričom  $m_1 = 0,13$  pre  $B_z \geq 0$  a  $m_1 = 0,14$  pre  $B_z < 0$ . Zaujímavosťou je použitie 6,6-tej odmocniny z dynamického tlaku pre určenie vzdialenosti subsolárneho bodu. Teoretické predpovede, ako aj ostatné modely berú v prípade subsolárneho bodu do úvahy len vplyv dipólového poľa a počítajú ho ako 6. odmocninu z  $p_{sw}$ . K hodnote 6,6 dospeli autori modelu pomocou analýzy experimentálnych dát. Spoľahlivosť modelu bola overená pre dynamické tlaky v rozsahu  $0,5 \text{ nPa} < p_{sw} < 8,5 \text{ nPa}$  a pre magnetické polia v rozsahu  $-18 \text{ nT} < B_z < 18 \text{ nT}$ .

**Alexeev et al. (1999)**

Tvar a poloha magnetopauzy v tomto modeli je vyjadrená paraboloidom. Do úvahy sa berie závislosť na orientácii medziplanetárneho magnetického poľa IMF  $B_z$ . Druhým vstupným

parametrom je dynamický tlak  $p_{sw}$ . Vzdialenosť magnetopauzy od Zeme je určená vzťahom

$$\rho = \sqrt{2(R_1^2 - R_1 x)}, \quad (2.18)$$

pričom  $R_1$  je vzdialenosť subsolárneho bodu, pre ktorú autori udávajú pre  $B_z \leq 0$

$$R_1 = \frac{11,3 + 0,39B_z}{\sqrt[6]{\frac{p_{sw}}{2,63}}},$$

pre  $B_z \geq 0$

$$R_1 = \frac{11,3 + 0,09B_z}{\sqrt[6]{\frac{p_{sw}}{2,47}}}.$$

Uvedené modely nie sú všetky, ktoré v priebehu rokov vznikli. Môžeme spomenúť napríklad Shue et al. (1998) a Kawano et al. (1999), ktoré sa zaoberajú magnetopauzou za extrémnych podmienok v slnečnom vetre. Posledným publikovaným modelom z dlhej rady je Lin et al. (2010). Všetky modely, ktorými sme sa zaoberali aj tie, ktoré sme len spomenuli sú empirické a líšia sa v zásade rôznym tvarom plochy, miestom, kde skúmajú polohu magnetopauzy, spôsobom zahrnutia jednotlivých parametrov alebo tiež súborom dát, ktorý využívajú. Už z faktu, že sú stále vyvíjané nové modely je zrejmé, že "najlepší" model zatiaľ nebol nájdený.

## 2.3 Dynamika magnetopauzy

Magnetopauza nie je v žiadnom prípade statickou hranicou. Je v neustálom pohybe a tento pohyb je možné detekovať v rôznych časových a priestorových škálach. Existuje niekoľko zdrojov vyvolávajúcich pohyb na magnetopauze. Jedným zo zdrojov krátkoperiodického pohybu (1 až 10 minút) je Kelvin-Helmholtzova nestabilita (Aubry et al., 1971). Ďalším zdrojom je fluktuácia dynamického tlaku slnečného vetra (Sibeck et al., 1989). V oblastiach nízkych geomagnetických šírok a vo väčších vzdialenostiach od subsolárneho bodu generuje Kelvin-Helmholtzova nestabilita vlny šíriace sa smerom k chvostu (Fitzenreiter and Ogilvie, 1995). Iným zdrojom oscilácii magnetopauzy sú zrejme udalosti Flux Transfer Events (FTE) (Russell and Elphic, 1978).

Sotirelis and Meng (1999) previedli výpočet v ktorom je tvar magnetopauzy určený požiadavkou, že tlak v prechodovej vrstve je vyrovnávaný magnetickým tlakom vo vnútri magnetosféry. Zistili, že výsledný tvar magnetopauzy sa mení s meniacim sa tilt uhlom. Magnetický chvost a vzdialenosť magnetopauzy (standoff location) sa posúvajú vertikálne (v opačných smeroch) pre nenulovú hodnotu tilt uhla. Vertikálny posun vzdialenosti magnetopauzy závisí lineárne na hodnote dipólového tilt uhla, pričom dosahuje hodnotu  $3R_E$  pre maximálny tilt a zároveň je trochu závislý na dynamickom tlaku. Model magnetického poľa použitý v ich štúdiu pre získanie magnetosférického magnetického poľa je modifikovaná verzia modelu Tsyganenko (1996).

## 2.4 Vlastnosti LLBL

Šírka LLBL rastie s rastúcou vzdialenosťou od prislnečného bodu a to od menej ako  $0,1 R_E$  v blízkosti lokálneho poludnia (Haerendel et al., 1978; Eastman and Hones, 1979) do viac ako  $0,5 R_E$  v oblastiach ranného a večerného terminátora (Paschmann et al., 1993)) a pri severnej orientácii IMF (Haerendel et al., 1978; Mitchell et al., 1987). Merania družíc však odhalili aj veľmi širokú LLBL (až niekoľko  $R_E$ ) (Sauvaud et al., 1997). Phan and Paschmann (1996) zase pozorovali v šírke LLBL pre jednotlivé prípady veľké variácie.

LLBL je komplikovane štrukturovaná, no vo všeobecnosti pozostáva z dvoch podvrstiev, ktorých definícia nie je ustálená. Niektorí autori podvrstvy odlišujú na základe parametrov plazmy, niektorí zase podľa magnetického poľa – otvorených, resp. uzatvorených siločiar. Podľa Song et al. (1990a) prvá podvrstva je nazývaná vonkajšia vrstva LLBL (z anglického Outer Boundary Layer). Dominujú v nej častice z prechodovej vrstvy. Druhá podvrstva - vnútorná (Inner Boundary Layer) je zase prevažne tvorená časticami magnetosférického pôvodu. Vo vonkajšej vrstve je koncentrácia a teplota plazmy pomerne stabilná, kým vo vnútornej vrstve teplota plazmy prudko narastá. Medzi týmito vrstvami môžu existovať aj ďalšie vrstvy homogénnej plazmy, čo je príznačné pre difúzne procesy. V štúdiu Song et al. (1993) bola v niektorých prípadoch preukázaná práve táto zložitejšia štruktúra LLBL, keď bola popísaná existencia ďalšej medzivrstvy medzi vnútornou a vonkajšou podvrstvou LLBL. V jednotlivých podvrstvách môže dochádzať k miernemu nárastu teploty. V prípade dvoch vrstiev, rozdelenie rýchlosti iónov je tvorené kombináciou dvoch populácií iónov, ktorých pomer sa systematicky mení.

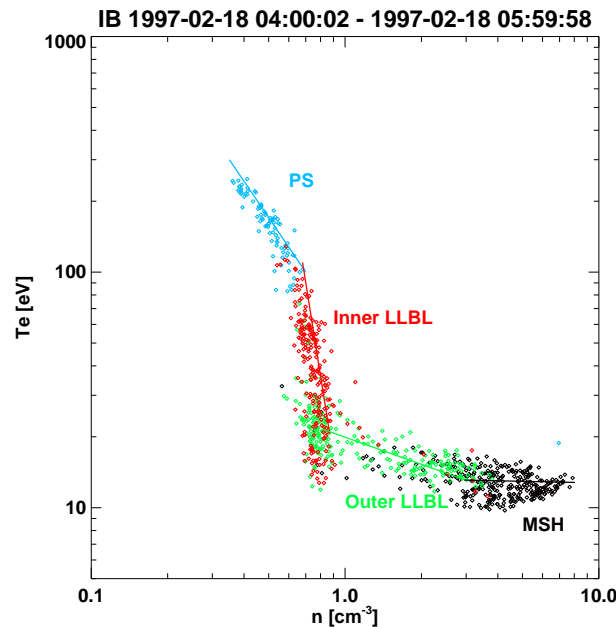
Na základe iónových dát previedli Le et al. (1996) ďalšiu štúdiu štruktúry LLBL. Ukázali, že vo vnútri vonkajšej vrstvy LLBL je minimálna populácia magnetosférických iónov, vyskytovala sa tu v podstate len zohriata plazma z prechodovej oblasti, na druhej strane vo vnútornej LLBL našli zmes plazmy z magnetosféry aj z prechodovej oblasti.

Vaisberg et al. (2001) taktiež potvrdili existenciu dvoch vrstiev LLBL oddelených tenkou hranicou. Ukázali, že vnútorná LLBL je tvorená zmesou oboch oblastí, pričom vo vnútornej LLBL sú vždy prítomné zachytené magnetosférické ióny, ktoré ale môžu byť prítomné aj vo vonkajšej LLBL. Naviac Bauer et al. (2001) demonštrovali, že dominantnou zložkou plazmy vo vonkajšej LLBL sú častice slnečného vetra, pričom parciálne hustoty častíc slnečného vetra a magnetosférických častíc sú vo vnútornej LLBL porovnateľné. Autori diskutovali horúce, protismerné (counterstreaming) elektróny pochádzajúce najmä z prechodovej oblasti majúce paralelnú teplotu (field aligned) 1 až 5 krát vyššiu, ako elektrónovú teplotu v prechodovej oblasti a sú charakteristickou vlastnosťou vnútornej LLBL.

### 2.4.1 Závislosť teploty na koncentrácii častíc

Pri prelete družice vrstvou LLBL sú zvyčajne detekované vysoko fluktuujúce hodnoty koncentrácie iónov a elektrónov a ich teploty. Hall et al. (1985) však zistili, že koncentrácia a

teplota síce silne fluktuujú, existuje však medzi nimi významná záporná korelácia, ktorú je možné vidieť zakreslením týchto hodnôt do vzájomného grafu, kde na jeho x-ovej ose je koncentrácia častíc a na y-ovej ose je ich teplota. V ďalšom texte budeme tento graf nazývať skrátene n-T. Jeho príkladom pre prechod vrstvou LLBL je obrázok 2.4, kde sú znázornené dáta z Interballu-1. Definícia hraníc bola prevedená podľa vzájomného vzťahu medzi koncentráciou a teplotou elektrónov. V pravej dolnej časti n-T grafu (vysoké koncentrácie, nízke teploty) je plazma z prechodovej oblasti, na opačnej strane (nízke koncentrácie, vysoké teploty) je plazma z plazmovej vrstvy (magnetosféry). Stredná oblasť grafu s meniacimi sa hodnotami koncentrácie a teploty predstavuje LLBL. To viedlo mnohých autorov štúdií k záveru, že LLBL vykazuje hladkú zmenu obidvoch veličín pozdĺž jej šírky a pozorované fluktuácie sú zrejme dôsledkom neustáleho pohybu LLBL. N-T ploty sú preto užitočným nástrojom pre štúdium štruktúry hraničnej vrstvy v nízkych šírkach.



Obr. 2.4: Príklad závislosti teploty elektrónov na koncentrácii pre prelet družice Interball-1 vrstvou LLBL dňa 18.2.1997. Oblasť s vysokou teplotou a nízkou koncentráciou označená svetlomodrou farbou predstavuje plazmovú vrstvu (plasma sheet). Na druhej strane grafu chladná oblasť s vysokou koncentráciou elektrónov označená čiernou farbou predstavuje prechodovú oblasť (magnetosheath). Červeno a zeleno značené oblasti s hodnotami teplôt a koncentrácií medzi plazmovou a prechodovou vrstvou sú vnútorná a vonkajšia LLBL.

V rozsiahlejšej štúdii Hall et al. (1991) ukázali, že LLBL má vnútornú a vonkajšiu časť podobnú tej, ktorú popísali Sckopke et al. (1981). Na základe elektrónových charakteristík v blízkosti dennej magnetopauzy použili Hapgood and Bryant (1990); Hall et al. (1991); Hapgood and Bryant (1992) techniku preskupenia dát v hraničnej vrstve pomocou tzv. prechodového parametra TP (z angl. Transition Parameter). Kým v prípade prirodze-

ného zoradenia dát na základe časovej postupnosti je štúdium jednotlivých štruktúr hraničných vrstiev komplikované, parameter TP, ktorý môžeme interpretovať ako relatívnu pozíciu vo vnútri hraničnej vrstvy, situáciu značne sprehľadňuje.

Fear et al. (2005) študovali hraničné vrstvy v oblasti kaspu a magnetopauzy pozorované družicami projektu Cluster dňa 25. januára 2002, pričom používali techniku n-T plotov a TP parametra. Parameter TP v tomto prípade použili k preskupeniu plazmatických dát a údajov o magnetickom poli. Touto metódou potvrdili štruktúru LLBL, pričom identifikovali 4 oblasti - magnetosféru, vnútornú LLBL, vonkajšiu LLBL a prechodovú oblasť, kde magnetopauza predstavuje rozhranie medzi vonkajšou LLBL a prechodovou oblasťou (magnetosheatom).

Inú štúdiu zaoberajúcu sa štruktúrou LLBL previedli Bogdanova et al. (2008). Použili k tomu viacbodové pozorovania družice Double Star TC1 v blízkosti prislnečnej magnetopauzy a pozorovania Clusteru v strednej výške v oblasti kaspu. Celá udalosť sa udiala za dlhého intervalu severne orientovaného IMF, pričom autori potvrdili zložitú štruktúru hraničných vrstiev: vrstvu PDL (Plasma Depletion Layer) a vrstvu MSBL (Magnetosheat Boundary Layer), ktorá je plnená novo prepojenými siločiarami v oblasti lobov v severnej hemisfére, znovu uzatvorenými siločiarami prepojenými po druhý krát v loboch na južnej hemisfére a existenciu tzv. prechodovej vrstvy (Transition Layer), ktorá vznikla zrejme difúznymi procesmi. Potvrdili, že technika TP parametra je užitočná aj pre interpretáciu takto zložitej udalosti.

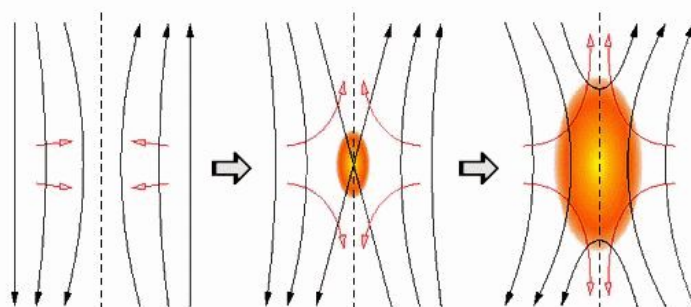
Foullon et al. (2008) modifikovali techniku TP parametra, aby mohli charakterizovať vývoj Kelvin-Helmholtzovej vlnovej aktivity na magnetopauze v súvislosti so zmenou šírky LLBL v oblasti ranného flanku. Potvrdili, že Kelvin-Helmholtzov mechanizmus prispieva k narastaniu šírky elektrónovej LLBL. Ich pozorovania sú v súhlase so štatistickou štúdiou prevedenou v Mitchell et al. (1987).

## 2.4.2 Prienik častíc a energie do magnetosféry

### Prepojovanie magnetických siločiar

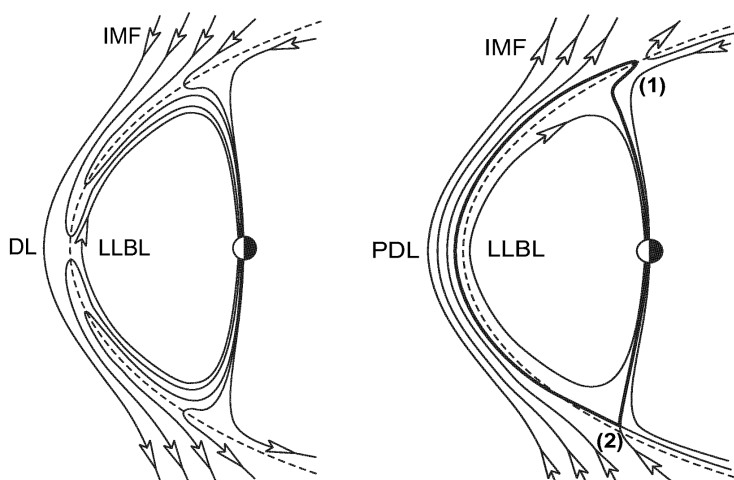
Prepojovanie siločiar magnetického poľa je dôležitým procesom, ktorý prispieva k prenosu plazmy slnečného vetra do zemskej magnetosféry. V prípade, že sa k sebe v plazme približia dve oblasti magnetického poľa s opačne orientovanými siločiarami, vznikne v tejto oblasti tzv. difúzny región. Ten je charakteristický veľmi nízkou hodnotou magnetického poľa a práve tu dôjde k zmene topológie magnetických siločiar a ich prepojeniu do konfigurácie s nižšou energiou. Pri prepojení tečú v difúznom regióne veľké elektrické prúdy, ktoré zahrievajú plazmu. Energia magnetického poľa je transformovaná do tepelnej energie plazmy, pričom je plazma vytlačovaná v smere pôvodnej orientácie siločiar. Situácia je znázornená na obr.2.5.

O tom, kde dôjde k prepojeniu magnetických siločiar v magnetosfére rozhoduje hlavne mierou orientácia medziplanetárneho magnetického poľa. V prípade, že IMF je južné (IMF  $B_Z < 0$ , tj. veľký magnetický strih (shear)), k prepojeniu siločiar dochádza v oblasti



Obr. 2.5: Náčrt prepojovania magnetických siločiar. Obrázok prevzatý z [www.aldebaran.cz](http://www.aldebaran.cz).

prislnečného bodu, ako je znázornené na ľavej strane obr. 2.6. Prislnečné prepojenie vytvorí prúdovú vrstvu na magnetopauze reprezentovanú sľučkami siločiar magnetického poľa. Vnútna časť prepojených siločiar patrí vrstve LLBL, kým vonkajšia vytvára "sheath transition layers" (Russell, 1995). Vlastnosti plazmy sa v týchto dvoch oblastiach líšia vzhľadom k histórii, akou plazma do danej oblasti prenikla. Pôvodná LLBL obsahovala horúcu a riedku magnetosférickú plazmu, ku ktorej sa vďaka prepojeniu siločiar dostala populácia urýchlených nabitých častíc z prechodovej oblasti. Vo vnútri LLBL preto môžeme pozorovať zmes týchto dvoch populácií častíc.



Obr. 2.6: Znázornenie situácie prepojovania magnetických siločiar pre prislnečnú oblasť pre južné (vľavo) a severné (vpravo) medziopl. magnetické pole.

Magnetosférické ióny po prepojení nie sú schopné nasledovať sľučku siločiar, nakoľko ich gyrorádus je príliš veľký, no elektróny s menším gyropolomerom áno a preto nasledujú siločiaru a tečú smerom preč od miesta prepojenia. Vo vrstve LLBL elektróny urýchlené počas prepojenia pokračujú smerom k ionosfére. Efekt magnetického zrkadla spôsobí vznik

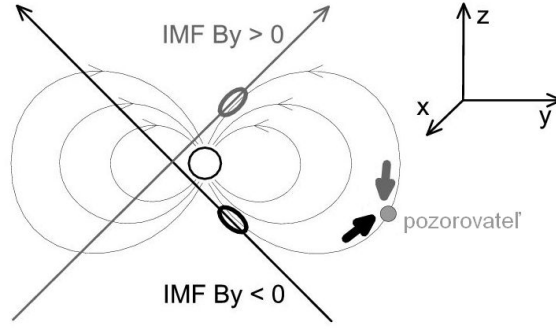
protismerných tokov elektrónov viditeľný v elektrónových energetických spektrách. Čo sa týka iónov, podobný efekt v iónových spektrách neuvidíme, nakoľko čas potrebný k ceste odrazených iónov k pozorovateľovi je porovnateľný s časom  $\vec{E} \times \vec{B}$  driftu. V prípade prislnečného prepojenia vrstva LLBL takmer pokrýva subsolárnu oblasť pod kaspami. Na druhej strane, keďže všetky prepojené siločiarly eventuálne vstupujú do magnetického plášťa, tento model nedokáže popísať vrstvu LLBL vo flankovej oblasti. Na nočnej strane magnetosféry sa častice dostávajú do oblasti plazmatických lóbov, kde indukujú ďalšie prepojovanie siločiar a tvorbu plazmoidov so zamrznutým magnetickým pólom.

Situácia pre severné IMF (malý magnetický strih) je znázornená na pravej strane obr. 2.6, ako ju navrhli Song and Russell (1992). K prepojeniu siločiar dôjde v smere k pólom od magnetosférického kaspu (bod (1) na obrázku). Novo-prepojené siločiarly pokrývajú dennú magnetopauzu. Tieto siločiarly sa môžu znovu prepojiť na opačnej hemisfére (bod (2) na obrázku), pričom uzatvoria zmes magnetosférickej plazmy a plazmy z prechodovej oblasti vo vnútri magnetosféry. Konvekcia posunie siločiarly LLBL smerom k chvostu vytvárajac flank. Keďže proces konvekcie je pomalý, parametre plazmy sa budú ďalej vyvíjať a dá sa očakávať, že vlastnosti LLBL na flanke vytvorené týmto mechanizmom budú odlišné o tej v prislnečnej oblasti.

Z predošlého popisu situácie je zrejmé, že pri formovaní LLBL hrá kľúčovú úlohu problematika otvorených a uzatvorených siločiar magnetického poľa. Na základe in-situ pozorovaní častíc Hall et al. (1991) navrhli, že vrstva LLBL leží na kombinácii otvorených a uzatvorených magnetických siločiar. Na druhej strane Fuselier et al. (1995) tvrdia, že LLBL leží na otvorených siločiarach aj v prípade, že magnetický strih naprieč lokálnou magnetopauzou je malý. Song and Russell (1992) sa domnievajú, že pri severnom IMF sa plazma dostáva do LLBL z vysokých šírok. Le et al. (1996) zistili, že LLBL s malým strihom leží na kombinácii otvorených a uzavretých siločiar. Podobné výsledky dosiahnuté v Paschmann et al. (1993) ukazujú, že pri podmienkach nízkeho magnetického strihu môžu byť zmeny v tepelných a tokových vlastnostiach plazmy priradené k zmene z otvorených siločiar magnetického poľa na uzatvorené.

Chvostová časť magnetopauzy je preskúmaná menej. Aj pre túto oblasť existujú práce popisujúce prepojovanie siločiar (Gosling et al., 1986), žiaľ zatiaľ nie je úplne zrejmé, ako často k tomuto javu dochádza. Zistilo sa, že LLBL sa v tejto oblasti bežne nachádza na uzatvorených siločiarach (Eastman and Hones, 1979). Z vlastností vysokoenergetických elektrónov Mitchell et al. (1987) odvodili, že flanky LLBL ležia na uzatvorených siločiarach pre severné IMF, no na čiastočne otvorených siločiarach pre južné IMF.

Na formovanie LLBL má okrem  $B_Z$  komponenty magnetického poľa vplyv tiež  $B_Y$  komponenta. Prítomnosť  $B_Y$  komponenty posúva oblasť prepojovania siločiar smerom k rannej, resp. večernej oblasti, ako je schematicky naznačené na obr.2.7. V prípade záporného IMF  $B_Y$ , prepojenie na južnej pologuli je posunuté smerom k večernému kaspu a pozorovateľ detekuje ióny s malými pitch uhlami, kým v opačnom prípade s veľkými hodnotami pitch



Obr. 2.7: Schematický náčrtok smeru tokov plazmy pri rôznych orientáciách komponenty IMF  $B_Y$ .

uhlov (Safrankova et al., 2007).

### Difúzia

Difúzia je jedným z procesov, ktoré prispievajú k premiešavaniu plazmy z prechodovej vrstvy a z magnetosféry (napr. Eastman and Hones (1979)). Tento mechanizmus môže jednoducho vysvetliť hladké zmeny v parametroch plazmy pozdĺž LLBL.

Skopke et al. (1981) zisťovali, či difúzia môže byť zodpovedná za plnenie LLBL plazmou. Z jednoduchého prechodu magnetopauzy určili hodnotu difúzneho koeficientu  $D \approx 10^9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , ktorá je všeobecne používaná ako test pre rôzne difúzne mechanizmy. V prípade, že pre testovaný mechanizmus je difúzny koeficient menší, berie sa, že nie je použiteľný pre LLBL. Pochopiteľne, hodnota  $D \approx 10^9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  nie je pevnou hranicou, podmienky pre minimálny difúzny koeficient môžu byť prípad od prípadu odlišné.

Ak sa vezme určitá hraničná vrstva so šírkou  $w$ , koncentráciou častíc  $n$ , celkovou rýchlosťou plazmy  $v$ , výsledný tok bude  $F = wnv$ . V mieste pozorovania vo vzdialenosti  $L$  od prislúchajúceho bodu bude priemerná hustota toku cez magnetopauzu  $\langle F \rangle = wnv/L$ . V prípade, že celý tok pripadne na difúziu, tak bude platiť

$$\langle F \rangle = D\delta n/h, \quad (2.19)$$

kde  $D$  je difúzny koeficient,  $\delta n$  je zmena koncentrácie pozdĺž difúznej vrstvy šírky  $h$ . Je potrebné poznamenať, že šírka difúznej vrstvy môže byť menšia, ako šírka celej vrstvy (v našom prípade LLBL). Za transport častíc vo zvyšku vrstvy tak môžu byť zodpovedné iné procesy.

Pre prechod flankovou LLBL ( $L = 18R_E$ ) dostali Skopke et al. (1981) pre hodnoty  $w = 0,5 R_E$ ,  $n = 8 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\delta n = 27 \text{ cm}^{-3}$ ,  $v = 150 \text{ km/s}$  výsledný pomer  $D/h = 2,5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ . Difúzny koeficient  $D$  tak závisí na šírke vrstvy  $h$ , kde difúzia prebieha. Skopke et al. (1981) predpokladali, že difúzia prebehla skrz magnetopauzu (s typickou šírkou 400 km), výsledný koeficient im tak vyšiel  $D \sim 10^9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .



Očakáva sa, že difúzny koeficient bude pre jednotlivé prechody hraničnou vrstvou odlišný. Phan and Pachmann (1996) sa zamerali na možný rozptyl hodnôt  $w$  a  $h$  meraných v oblastiach s lokálnymi časmi 8 - 16 LT a dospeli k experimentálnemu rozptylu hodnoty difúzneho koeficientu

$$2 \cdot 10^7 < D < 3 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}. \quad (2.20)$$

Je nutné poznamenať, že vo väčšine prípadov je difúzny koeficient príliš malý na to, aby proces difúzie mohol byť zodpovedný za všetko pozorované množstvo plazmy z prechodovej oblasti v LLBL. Okrem toho, plazma z prechodovej oblasti vstupujúca do hraničnej vrstvy nemôže difúznym procesom získať potrebný impulz, ktorý by otočil celkový tok smerom k Slnku, čo je často pozorované.

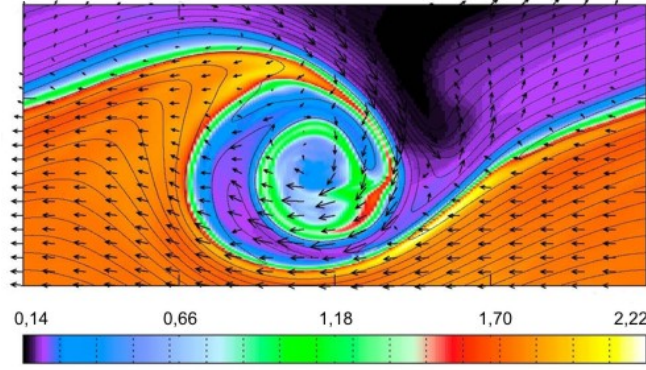
### Spontánny prechod

Ďalší z možných mechanizmov vstupu častíc skrz magnetopauzu súvisí s  $\vec{E} \times \vec{B}$  driftom. Keďže zemské magnetické pole je v oblasti prislnečnej magnetopauzy orientované severne, plazmatické zhľuky vystavené elektrickému poľu v smere osy Y by mohli prechádzať do magnetosféry. Koncept tohoto spontánneho prechodu (angl. impulsive penetration) predstavili Lemaire and Roth (1978). Elektrické pole podieľajúce sa na  $\vec{E} \times \vec{B}$  drifte môže byť generované napríklad v dôsledku rozdielnych rotačných polomerov elektrónov a iónov. Proces spontánneho prechodu hrá zrejme významnejšiu úlohu v oblastiach dennej magnetopauzy pri uzatvorených siločiarach magnetického poľa. Presnejšie experimentálne meranie tohoto procesu umožnili družice projektu Cluster. Lundin et al. (2003) sledovali plazmatické zhľuky injektované skrz dennú magnetopauzu vo vysokých geomagnetických šírkach. Spontánne prenikanie je podľa tejto štúdie účinnejšie pri severnej orientácii IMF. Prenikanie plazmy pri južnom IMF prisudzujú procesu FTE (z angl. Flux Trasfer Events).

### Kelvin-Helmholtzova nestabilita

Kelvin-Helmholtzova nestabilita (ďalej KHI (z angl. Kelvin-Helmholtz Instability)) je nestabilita vznikajúca na rozhraní dvoch prostredí s rôznou rýchlosťou (napr. vietor na vodnej hladine), pričom často dochádza k vytváraniu typických vírov (viď. obr. 2.8). K rovnakej situácii môže dochádzať aj na hraniciach magnetosféry, kde vznikajú KH nestabilitou víry veľkosti 40 000 až 55 000 km. V týchto víroch sa premiešava plazma slnečného vetra s plazmou magnetosféry, pričom sa siločiar medziplanetárneho magnetického poľa, ktoré sú prinášané slnečným vetrom, dostávajú do protismeru so siločiarami magnetosféry. V takej situácii dochádza k prepojeniu siločiar a po novovzniknutej siločiare prenikajú častice slnečného vetra do vnútornej magnetosféry.

V najjednoduchšom lineárnom magnetohydrodynamickom (ďalej MHD) popise, kde predpokladáme pre KHI ideálnu nestlačiteľnú plazmu a nekonečne tenkú hraničnú vrstvu



Obr. 2.8: Numerická simulácia vzniku KH nestability na bočnej hranici magnetosféry. Farebne je označená hustota plazmy (fialovej zodpovedá slnečný vietor, oranžovej hustota magnetosférickej plazmy). Šípkami je znázornená rýchlosť častíc a sivými čiarami magnetické siločiar. Prevzaté z [www.aldebaran.cz](http://www.aldebaran.cz).

s rôznymi veľkosťami rýchlostí toku na jej stranách, sa KHI rozvinie, ak platí nasledujúca nerovnosť:

$$\left[ \vec{k} \cdot (\vec{V}_1 - \vec{V}_2) \right]^2 > \frac{n_1 + n_2}{\mu_0 m_p n_1 n_2} \left[ (\vec{k} \cdot \vec{B}_1)^2 + (\vec{k} \cdot \vec{B}_2)^2 \right], \quad (2.21)$$

kde indexy 1 a 2 predstavujú plazmatické prostredia na dvoch stranách hranice,  $n$  je koncentrácia častíc,  $m_p$  je protónová hmotnosť,  $\mu_0$  je permeabilita vákua,  $\vec{V}$  je rýchlosť toku plazmy,  $\vec{B}$  je magnetické pole a  $\vec{k}$  je vlnový vektor.  $\vec{V}$ ,  $\vec{B}$  a  $\vec{k}$  sú tangenciálne k ploche. Z nerovnosti 2.21 vyplýva, že KH vlny sú zapríčinené rýchlostným gradientom  $|\vec{V}_1 - \vec{V}_2|$  medzi rýchlo sa pohybujúcimi časticami prechodovej vrstvy a relatívne pomalšie sa pohybujúcimi časticami magnetosféry. Z ľavej strany nerovnice 2.21 plynie, že kritérium pre vznik nestability je s väčšou pravdepodobnosťou splnené pre propagáciu vln v smere veľkého rozdielu rýchlostí toku. Z pravej strany nerovnice 2.21 zase vyplýva, že hranica prahu nad ktorým môže KHI vzniknúť je znížená v oblastiach s malým či veľkým magnetickým strihom, ďalej pre siločiar medzi prechodovou oblasťou a magnetosférou a pre vlny šíriace sa kolmo k magnetickému poľu.

Výskyt KHI je pravdepodobnejší v časoch rýchlejšieho prúdenia slnečného vetra a vo väčších vzdialenostiach smerom k chvostu, nakoľko rýchlosti plazmy v prechodovej oblasti aj LLBL sa zvyšujú so vzdialenosťou od prislnečného bodu. Nestabilitu ďalej môžeme nájsť s väčšou pravdepodobnosťou v rovníkových oblastiach oproti polárnym, nakoľko magnetické pole v oblasti rovníka je vo všeobecnosti priečne oproti smeru toku v prechodovej oblasti, kým polárne magnetické pole je všeobecne paralelné a antiparalelné k toku. Okrem toho, rovníkové magnetické pole je zvyčajne slabšie ako pole vo vysokých geom. šírkach a preto má menšiu stabilizačnú schopnosť.

Ukazuje sa, že pri severne orientovanom IMF by popri dvojitoj prepojení magnetických siločiar polárnym smerom od kaspu a zachytením plazmy na uzatvorených siločiarach (Song and Russell, 1992; Onsager et al., 2001; Lavraud et al., 2005) mohla byť práve KHI rozvinutá pozdĺž chvostovej magnetopauzy konkurenčným zdrojom vstupu plazmy do magnetosféry (Fujimoto and Terasawa, 1994). Štúdie Nakamura et al. (2004); Matsumoto and Hoshino (2004, 2006) na základe počítačovej simulácie ukázali, že sekundárne nestability indukované vírmi, ktoré sa objavujú v turbulentnej fáze KHI uľahčujú transport plazmy do magnetosféry. Iné numerické modely (Nakamura and Fujimoto, 2005; Nakamura et al., 2006) zase ukazujú, že vznik nových lokálnych prepojení siločiar magnetického poľa skrz ktoré je plazma transportovaná do magnetosféry, je práve dôsledkom rozvinutia KHI. Väčšina numerických štúdií poukazuje na to, že procesy transferu plazmy procesom KHI sú možné až pri plnom rozvinutí vírov nestability. Experimentálne pre severné IMF potvrdili Hasegawa et al. (2006) pomerne častý výskyt týchto vírov na obidvoch flankoch magnetosféry, pričom vo všetkých prípadoch vírov bola nájdená plazma z prechodovej oblasti vo vnútri magnetosféry. Foullon et al. (2008) potvrdili, že KHI je jednou z príčin rozširovania elektrónovej LLBL na večernej chvostovej strane magnetopauzy. To potvrdzuje všeobecne nezanedbateľný podiel KHI pri formovaní chvostovej LLBL.



## Kapitola 3

# Ciel' práce

Ako vyplýva z predchádzajúcej kapitoly, poloha a tvar magnetopauzy je popisovaná celou radou empirických modelov, ktoré boli vytvorené na základe pozorovaní prechodov magnetopauzy rôznymi družicami v rôznych obdobiach. Ani jeden z týchto modelov nie je ideálny. Štatistickou štúdiou veľkého množstva prechodov magnetopauzy, ktoré sme mali k dispozícii (široká škála oblastí od prislnečnej až po flank, vysoké aj nízke geomagnetické šírky), sme chceli prispieť k zlepšeniu existujúcich modelov hľadaním ďalších parametrov, na ktorých tvar a poloha magnetopauzy môže závisieť. Takisto v prípade vlastnej štruktúry magnetopauzy, kde v jej rôznych oblastiach hrajú hlavnú úlohu rôzne procesy, je v súčasnej dobe ešte stále veľa otvorených otázok. Z celej škály problémov sme sa rozhodli sústrediť na štruktúru magnetopauzy v nízkych geomagnetických šírkach, kde je dôležitá prítomnosť vrstvy LLBL. Kvalita dát a dostupnosť ďalších potrebných údajov zo slnečných monitorov umožňovala v mnohých prípadoch podrobnejšie analyzovanie jednotlivých udalostí. Ciele práce sme si preto určili nasledovne:

- Porovnať predpovede tvaru a polohy magnetopauzy, ktoré poskytujú najčastejšie používané modely so skutočne meranými hodnotami a vybrať najlepší z nich.
- Analyzovať vplyv parametrov slnečného vetra a medziplanetárneho magnetického poľa na polohu a tvar magnetopauzy, oddelene v nízkych a vysokých geomagnetických šírkach a tu sa sústrediť na oblasť kaspu.
- Previesť štatistickú štúdiu v prislnečnej oblasti na dátach z družíc projektu Themis z obdobia slnečného minima v rokoch 2007 - 2008 a porovnať výsledky pre sety dát v prislnečnej oblasti z rokov 1995-1998 a 2007-2008.
- Na základe časov prechodov magnetopauzy družicami Interball-1 a Magion 4 vyhľadať prechody vrstvou LLBL a vybrať udalosti vhodné pre podrobnejšie prípadové štúdie smerujúce k analýze profilov.
- Pre zistené prechody vrstvou LLBL zobrazíť a analyzovať n-T závislosti a na ich základe identifikovať jednotlivé oblasti LLBL.
- Zistiť vplyv parametrov slnečného vetra a IMF na n-T profily vo flankovej oblasti.



## Kapitola 4

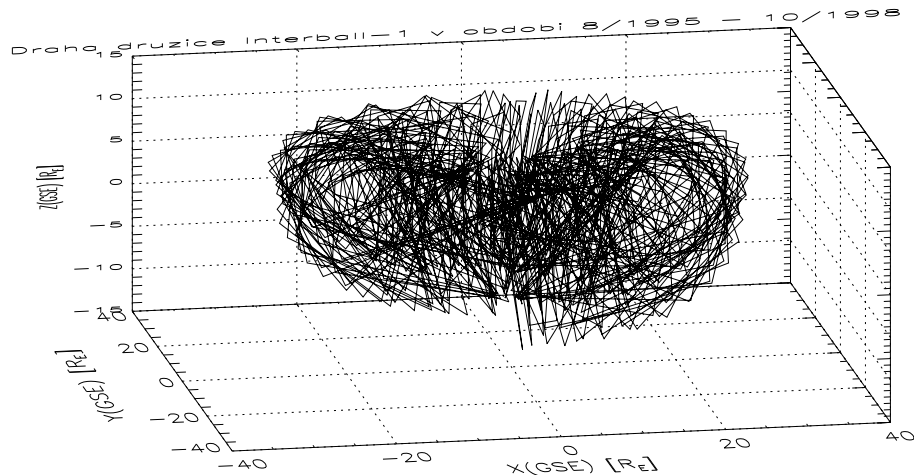
# Zdroje družicových dát

Pre štúdium dynamiky polohy magnetopauzy za rôznych podmienok sme používali hlavne merania z družíc Interball-1 a Magion 4 v rôznych lokálnych časoch a geomagnetických šírkach. Pre štúdium v nízkych geomagnetických šírkach väčšina prechodov magnetopauzy pochádzala z družice Geotail. V neskoršom období k dátovému súboru prechodov magnetopauzy z uvedených troch družíc pribudol dátový súbor z družíc projektu Themis, ktorý obsahoval najmä prechody magnetopauzy z prislúchajúcej oblasti. Pre štúdium vlastností vrstvy LLBL sme vo väčšine prípadov použili dáta z družice Interball-1. Analyzovali sme aj niekoľko dvojbodových spoločných meraní družíc Interball-1 a Magion 4 a v závere práce sme načrtli možnosti viacbodových meraní družíc projektu Themis.

V tejto kapitole uvádzame prehľad používaných družíc a prístrojov, ktorých merania sme použili k vlastnej identifikácii prechodov magnetopauzy. Okrem uvedených družíc Interball-1, Magion 4, Geotail a Themis sme používali údaje z tzv. monitorov slnečného vetra, ktorými boli družice Wind a ACE. Merania týchto družíc poslúžili ako vstupné dáta pre modely magnetopauzy a tiež pre identifikáciu vonkajších podmienok, ktoré riadia procesy na magnetopauze a v LLBL.

### 4.1 Družice Interball-1 a Magion 4

Projekt Interball pozostával z dvoch družíc (Interball-1 a Interball-2) a dvoch subdružíc (Magion 4 a Magion 5). Usporiadanie družica - subdružica umožňovalo viacbodové štúdium menších štruktúr a dynamiky pozorovaných oblastí. Pre naše štúdium sme používali dáta z dvojice družíc Interball-1 a Magion 4 (nazývané tiež Chvostové sondy (tail probes)), ktoré odštartovali 3. augusta 1995. Ich dráha bola eliptická s perigeom od 500 do 25 000 km, apogeom takmer 200 000 km a sklonom  $62,8^\circ$  (Zelenyi and Sauvaud, 1997). Náčrtok dráhy družice v období 8/1995 až 10/1998 je na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Vývoj dráhy družice Interball-1 v období od 8/1995 do 10/1998.

#### 4.1.1 Prístrojové vybavenie

##### 3D elektrónový spektrometer ELEKTRON

ELEKTRON meral elektrónové distribučné funkcie v magnetosfére, prechodovej oblasti a v slnečnom vetre. Zariadenie rozdeľovalo elektróny podľa ich energií pomocou symetrického hemisférického elektrostatického analyzátoru. Zorné pole detektoru bolo  $180^\circ$ , pričom s využitím rotácie družice bol pokrytý celý priestorový uhol  $4\pi$ . Merací rozsah spektrometra bol 10 eV až 25 keV. V závislosti na operačnom móde bolo možné počas jednej otáčky získať 16 alebo 32 energetických spektier s logaritmicke škálovanou energiou (Sauvaud et al., 1997).

##### Vše-smerový plazmový senzor VDP

Základ tohoto prístroja tvorili tzv. Faradayove valce schopné merať vlastnosti magnetosférickej plazmy v priestorovom uhle  $4\pi$ . Detektor dokázal prevádzať tieto merania:

- Meranie sumy celkového toku elektrónov a iónov s energiou väčšou ako 2,4 eV.
- Meranie sumy toku elektrónov s energiou väčšou ako 170 eV a celkový tok iónov s energiou väčšou ako 2,4 keV.
- Meranie sumy integrovaného energetického spektra iónov v rozsahu 0,2 až 2,4 keV a toku elektrónov s energiou väčšou ako 2,4 keV.
- Meranie sumy integrovaného energetického spektra elektrónov v rozsahu 0,2 až 2,4 keV a toku iónov s energiou väčšou ako 2,4 keV.

Dáta z tohoto detektoru zohrali významnú úlohu pri určovaní okamihu prechodu družice magnetopauzou (Safrankova et al., 1997a).



### 3D iónový energetický spektrometer CORALL

Prístroj bol tvorený hemisférickým elektrostatickým analyzátorom. Poskytoval trojrozmernú iónovú distribučnú funkciu ako aj merania obsadenia magnetosférických iónov v plazmovej vrstve v magnetosférickom chvoste. Iónové charakteristiky v rozsahu energie na náboj ( $E/q$ ) meral v hodnotách od 30 do 24 200 eV/q. Distribučnú funkciu vďaka zornému poľu vstupnej štrbiny  $5 \times 110^\circ$  a doby otáčania družice bolo možné získať raz za pribl. 120 sekúnd (Yermolayev et al., 1997).

### Magnetometre MIF-M a FM-3I

Magnetické pole bolo merané pomocou prístrojov MIF-M a FM-3I. Magnetometer MIF-M mal merací rozsah 0,3 až 37,5 nT, frekvenčný rozsah od 0 do 2 Hz a vzorkovací kmitočet 0,25 až 8 meraní za sekundu. Prístroj FM-3I pozostával z dvoch nezávislých komparačných (fluxgate) magnetometrov M1 a M2, ktoré pokrývali rozsahy  $\pm 200$  nT resp.  $\pm 1000$  nT. Presnosť meraní bola  $\pm 0,1$  nT resp.  $\pm 1$  nT. Vzorkovací kmitočet pre M1 bol 0,125 až 16 vektorov za sekundu, pre M2 to bol 1 vektor za 6 sekúnd. Prístroj M2 bol určený predovšetkým pre meranie polohy družice. Magnetometer FM-3 M2 prestal fungovať vo februári 1996, magnetometer FM-3 M1 pracoval až do ukončenia misie v októbri 2000 (Klimov et al., 1997).

### Spektrometer DOK-2

Prístroj DOK-2 slúžil pre štúdium urýchľovania energetických častíc a ich transport vo vnútri magnetosféry a na jej hraniciach. Spektrometer meral energetické spektrá elektrónov v rozsahu 25 až 400 keV a iónov v rozsahu 20 až 850 keV. Skladal sa z dvoch párov detektorov. Jeden z detektorov v páre bol vybavený tenkou (0,3 mm) fóliou pohlcujúcou ióny s energiami  $< 400$  keV a druhý magnetom, ktorý odkláňal elektróny do energie 1500 keV (Lutsenko et al., 1998).

### Detektor plazmového toku VDP-S

Prístroj VDP-S bol umiestnený na subdružici Magion 4. Jeho základ tvorili 4 identické Faradayove valce symetricky rozmiestnené na povrchu družice. Žiaľ kvôli nesprávnemu nakloneniu družice, ktoré vzniklo nesprávnym vysunutím jedného zo solárnych panelov, jeden z Faradayových valcov mieril takmer priamo na Slnko, čím poskytoval nesprávne merania v dôsledku fotoprúdu (Safrankova et al., 1997b).

### Plazmové spektrometre MPS a SPS

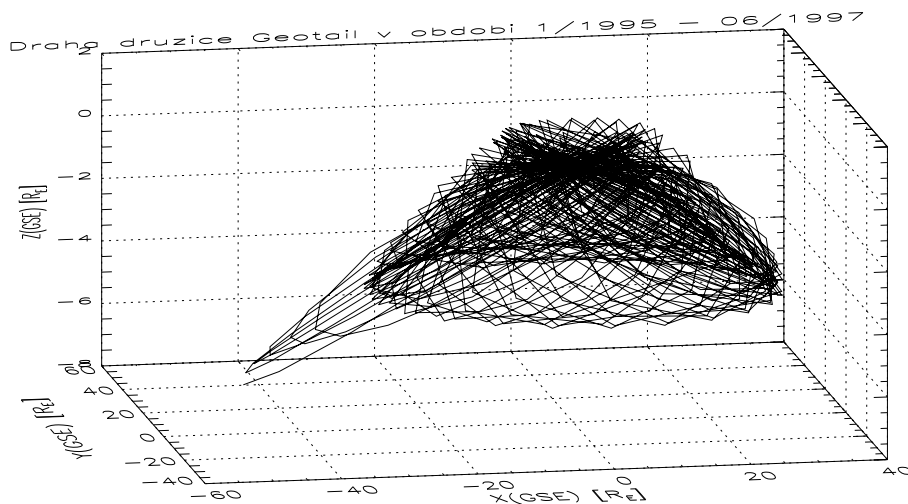
Prístroje umiestnené na subdružici Magion 4, boli konštruované pre monitorovanie parametrov slnečného vetra a pre registráciu iónov odrazených od rázovej vlny. Orientácia prístroja

MPS mala v magnetosférickom chvoste umožňovať určenie úniku iónov z ionosféry a hľadanie protismerných iónových zväzkov. Čidlá MPS boli umiestnené na opačných koncoch pozdĺž hlavnej osy družice. Pre určenie úplnej rozdeľovacej funkcie bol spektrometer MPS doplnený spektrometrom SPS, ktorého 3 kanály pokrývali oblasť mimo hlavnú osu družice. Energetický rozsah prístroja bol 200 eV až 25 keV (Nemecek et al., 1997).

## 4.2 Projekt Geotail

Geotail je spoločným projektom japonského vesmírneho inštitútu ISAS a amerického NASA. Cieľom misie bolo štúdium dynamiky oblasti magnetosférického chvostu v širokom rozmedzí vzdialeností 8 až  $200 R_E$  od Zeme. Štart družice sa uskutočnil 24. júla 1992 z Cape Canaveral na Floride (Nishida et al., 1997).

Projekt Geotail mal 2 fázy. Prvé dva roky sa družica pohybovala po veľmi pretiahnutej dráhe (za pomoci Mesačnej gravitácie) s apogoom až  $200 R_E$ . V druhej fáze projektu, z ktorej používame početné prechody magnetopauzou, bola dráha družice upravená tak, aby sledovala blízko-zemskú chvostovú oblasť (apogeum do  $30 R_E$ ). Dráha družice Geotail v období 1/1995 až 6/1997 je na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Vývoj dráhy družice Geotail v období od 1/1995 až 6/1997.

### 4.2.1 Prístrojové vybavenie

Na sonde je umiestnených 7 prístrojov, pre našu prácu boli najdôležitejšie magnetometer MGF a analyzátor LEP.

### Magnetometer MGF

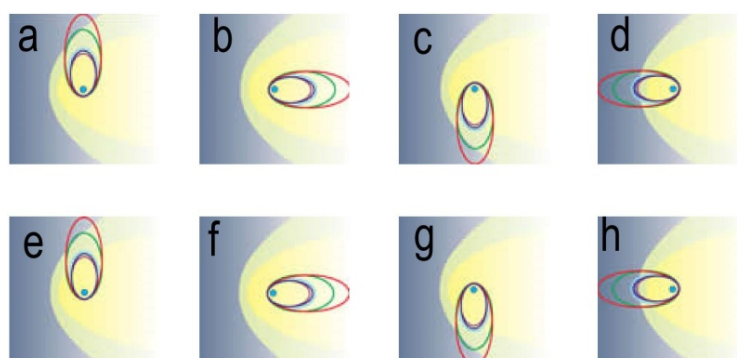
Magnetometer pozostáva z dvoch typov: indukčného (search coil) a komparačného (fluxgate) magnetometra. Indukčný magnetometer pracuje s frekvenčným rozsahom 0,5 kHz až 1 kHz a poskytuje 128 vektorov magnetického poľa za sekundu. Komparačný magnetometer pracuje v 7 režimoch kvôli pokrytiu rôznych oblastí od magnetosféry až po slnečný vietor. Oblasti sú  $\pm 16$  nT,  $\pm 64$  nT,  $\pm 256$  nT,  $\pm 1024$  nT,  $\pm 4096$  nT,  $\pm 16384$  nT a  $\pm 65536$  nT. Frekvencia merania je 16 vektorov magnetického poľa za sekundu (Kokubun et al., 1994).

### Analyzátor LEP

Analyzátor LEP pozostáva z troch senzorov (LEP-EA, LEP-SW a LEP-MS). LEP-EA meria 3D rozdelenie rýchlosti horúcej plazmy v magnetosfére. Tvoria ho 2 elektrostatické analyzátory s rozsahmi meraní 6 až 36 eV pre elektróny a 7 eV/Q až 42 keV/Q pre kladné ióny. LEP-SW meria 3D rozdelenie rýchlosti iónov slnečného vetra v energetických rozsahoch 0,1 až 8 keV/Q. LEP-MS je hmotnostným spektrometrom, ktorý skúma 3D zloženie iónov v 32 krokoch v energetickom rozsahu 0 až 25 keV/Q (Mukai et al., 1994).

## 4.3 Družice Themis A až E

Misia **THEMIS** - názov je akronymom z **T**ime **H**istory of **E**vents and **M**acroscale **I**nteractions during **S**ubstorms a tiež je to meno bohyně z gréckej mytológie. Pozostáva z piatich identických družíc umiestnených na silne eliptických dráhach, ktoré boli dňa 17.2.2007 vynesené spoločne raketou Delta II zo štartovacieho komplexu 17 na Myse Canaveral. Hlavnou úlohou družíc je výskum premenných javov v zemskej magnetosfére, súvisiacich najmä s vplyvom slnečnej aktivity a ich vplyvu na procesy vo vysokej atmosfére. Tieto javy stoja za vznikom a vývojom polárnych žiar a nasledujúcich elektrických búriek ovplyvňujúcich pozemné telekomunikácie a energetické distribučné siete.



Obr. 4.3: Orbity družíc Themis v jednotlivých fázach misie. Obrázok prevzatý z <http://themis.ssl.berkeley.edu>.

Dráhy družíc sa postupom času menili nasledujúcim spôsobom:

- 17.02.2007 - 15.09.2007 : Družice sa od štartu pohybovali po spoločnej orbite s apogeom  $15,4 R_E$  (bez obrázku).
- 15.09.2007 - 15.12.2007 : Družice sa pohybovali v rannej časti magnetosféry (obr. 4.3a).
- 15.12.2007 - 15.04.2008 : Družice sa pohybovali v magnetosférickom chvoste (obr. 4.3b).
- 15.04.2008 - 15.06.2008 : Družice sa pohybovali vo večernej časti magnetosféry (obr. 4.3c).
- 15.06.2008 - 15.10.2008 : Družice sa pohybovali na dennej strane magnetosféry (obr. 4.3d).

Vo všetkých 4 (a až d) fázach boli apogeá družíc 1 až 5 nasledovné:  $30 R_E$ ,  $20 R_E$ ,  $12 R_E$ ,  $12 R_E$  a  $10 R_E$ .

V ďalšej fáze projektu boli dráhy družíc nasledovné:

- 15.10.2008 - 15.12.2008 : Družice sa pohybovali v rannej časti magnetosféry (obr. 4.3e).
- 15.12.2008 - 15.04.2009 : Družice sa pohybovali v magnetosférickom chvoste (obr. 4.3f).
- 15.04.2009 - 15.06.2009 : Družice sa pohybovali vo večernej časti magnetosféry (obr. 4.3g).
- 15.06.2009 - 30.09.2009 : Družice sa pohybovali na dennej strane magnetosféry (obr. 4.3h).

Vo fázach (e až g) boli apogeá družíc 1 až 5 nasledovné:  $30 R_E$ ,  $20 R_E$ ,  $12 R_E$ ,  $12 R_E$  a  $12 R_E$ . Vo fáze h sa apogeum 5. družice zmenilo na  $13 R_E$ .

### 4.3.1 Prístrojové vybavenie

Pre účely nášho výskumu sme používali dáta z prístrojov ESA (Electrostatic analyzers) a FGM (Fluxgate magnetometers).

#### Elektrostatický analyzátor ESA

Elektrostatické analyzátory iónov a elektrónov (iESA a eESA) detekujú plazmu v energetickom rozsahu od 3 eV až po 30 keV pre elektróny a 3 eV až 25 keV pre ióny. Samotný prístroj sa skladá z páru "top hat" analyzátorov so zorným poľom  $180^\circ \times 6^\circ$ , ktoré pokrýva za dobu rotácie 3 sekundy priestorový uhol  $4\pi$ . Častice sú detekované mikrokáňkovými doštičkami a rozdelené do 6 skupín, ktorých energia, uhol a časové rozlíšenie závisí na prístrojovom režime. Zároveň sú spočítané momenty, pričom proces zahŕňa korekcie na potenciál družice. Iónový a elektrónový analyzátor sú umiestnené spoločne, aby poskytovali rovnaký uhol pohľadu.

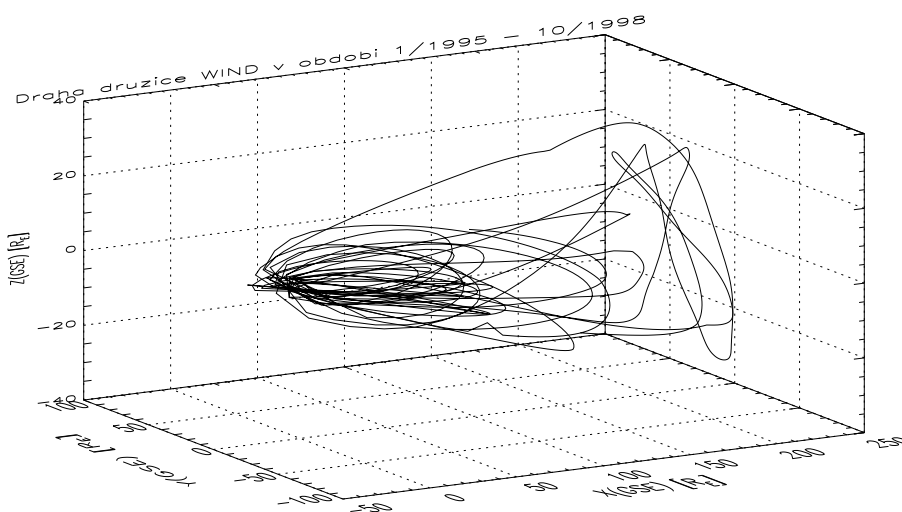
#### Indukčný trojosový magnetometer FGM

Indukčný trojosový magnetometer FGM meria magnetické pole a jeho nízko-frekvenčné fluktuácie (do 64 Hz) v okolozemskom priestore. Rozlišovacia schopnosť magnetometra je 0,01

nT. Maximálna veľkosť magnetického poľa merateľná týmto magnetometrom činí 25 000 nT (pole v blízkosti Zeme). Prístroj je zavesený na ramene s dĺžkou 2m.

## 4.4 Slnečný monitor WIND

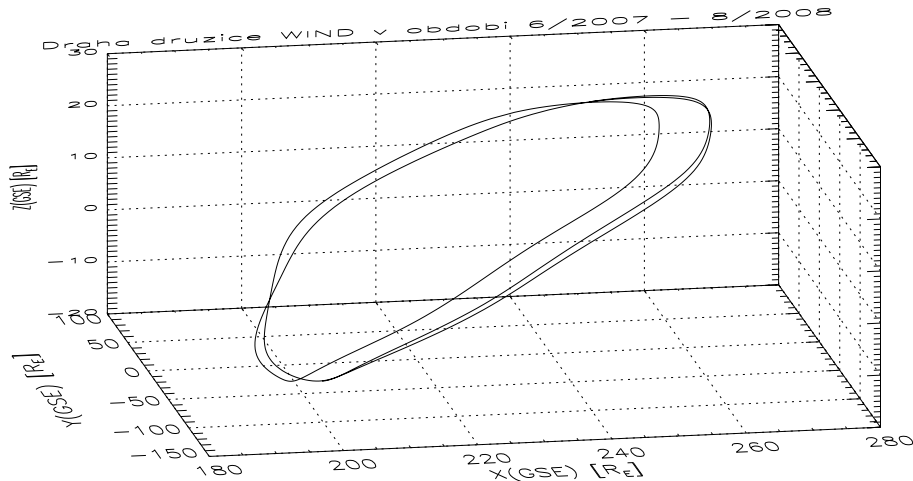
Družica WIND odštartovala 1.11.1994 v rámci ISTP projektu NASA. V prvej časti projektu (prvé dva roky) sa družica pohybovala po značne komplikovanej orbite s apogeom  $250 R_E$  (obr. 4.4). V ďalšej časti projektu sa pohybuje po dráhe v okolí libračného bodu L1 sústavy Zem-Slnko (obr. 4.5). Vedeckými cieľmi projektu je poskytovať merania vlastností plazmy, energetických častíc a magnetického poľa v okolí družice, ktoré sú používané pre štúdium magnetosféry a ionosféry, ako aj štúdium vlastností slnečného vetra v blízkosti Zeme. V rámci našej práce sme družicu Wind používali ako tzv. slnečný monitor k družiciam Interball-1, Magion 4 a Geotail v období 01/1995 až 10/1998 (až na prípady, keď sa Wind nachádzal za uvedenými družicami a nebolo možné ho použiť pre účely monitorovania parametrov slnečného vetra). V období 6/2007-8/2008 zase Wind poslúžil ako slnečný monitor k družiciam projektu Themis (od roku 2008 bolo možné použiť vzhľadom k zníženiu spoľahlivosti meraní magnetometra MFI len údaje z detektoru SWE).



Obr. 4.4: Vývoj dráhy družice WIND v období od 01/1995 do 10/1998.

### 4.4.1 Prístrojové vybavenie

Parametre slnečného vetra a medziplanetárneho magnetického poľa sme získavali z prístrojov SWE (The Solar Wind Experiment) a MFI (The Magnetic Field Investigation).



Obr. 4.5: Vývoj dráhy družice WIND v období od 06/2007 do 08/2008.

### Detektor SWE

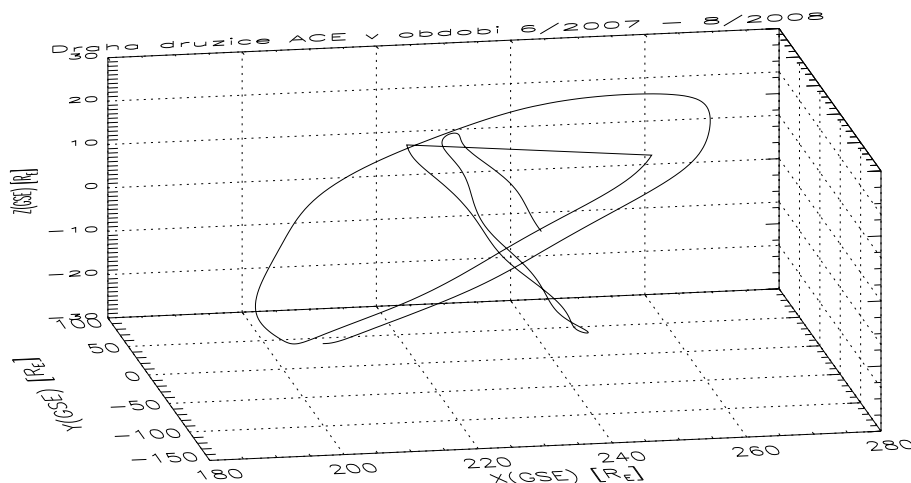
Detektor sa skladá z dvoch Faradayových valcov, dvoch vektorových elektrónových spektrometrov a jedného toroidálneho elektrostatického analyzátoru merajúceho rozdelenie rýchlosti elektrónov. Z údajov týchto prístrojov je možné určiť rýchlosť, 3D rozdelenia rýchlosti, koncentráciu a teplotu častíc slnečného vetra. Merací rozsah detektoru je pre ióny 200 eV až 8,0 keV, pre elektróny 5 eV až 5 keV (Ogilvie et al., 1995).

### Magnetometer MFI

Dva indukčné magnetometre sú umiestnené na koncoch 12 metrových ramien družice. Prístroj umožňuje meranie vektoru magnetického poľa s vysokým rozlíšením. Merací rozsah je  $\pm 0,004$  nT až  $\pm 65000$  nT v 8 diskretných rozsahoch. Maximálna frekvencia meraní je 44 záznamov za sekundu (Lepping et al., 1995).

## 4.5 Slnečný monitor ACE

Družica ACE (Advanced Composition Explorer) je navrhnutá pre zber informácií o časticiach slnečného, medziplanetárneho, medzihviezdneho a galaktického pôvodu zahrňajúc energie rádu keV (ióny slnečného vetra) až 600 MeV (jadrá častíc galaktického pôvodu). Misia začala 25.8.1997 vypustením družice z Kennedyho vesmírneho centra na Floride na halo-orbitu v okolí libračného bodu L1 sústavy Zem-Slnko (približná vzdialenosť 1 a pol milióna km od Zeme) (Smith et al., 1998). Družica ACE slúžila v našej práci taktiež ako slnečný monitor a to v období 6/2007 až 8/2008 pre družice projektu Themis. Vývoj jej dráhy v tomto období je znázornený na obr. 4.6.



Obr. 4.6: Vývoj dráhy družice ACE v období od 06/2007 do 8/2008.

#### 4.5.1 Prístrojové vybavenie

Na palube satelitu sa nachádza 9 prístrojov, z ktorých v rámci našej štúdie využívame dva. Parametre plazmy získavame z prístroja SWEPAM (Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor), hodnoty vektorov magnetického poľa z magnetometra MAG.

##### Analyzátor SWEPAM

Elektróny a ióny sú detekované pomocou dvoch separátnych elektrostatických analyzátorov. Energetický rozsah meraných iónov je 0,26 keV až 36 keV, energetický rozsah meraných elektrónov je medzi 1 až 1350 eV (McComas et al., 1998).

##### Magnetometer MAG

Skladá sa z dvoch trojosových komparačných (fluxgate) magnetometrov. Merací rozsah zariadenia je  $\pm 4$  nT až  $\pm 65536$  nT, rozlíšenie je  $\pm 0,001$  nT až  $\pm 16$  nT. Frekvencia merania je 24 vektorov za sekundu v rýchlom režime, resp. 3,4 alebo 6 vektorov za sekundu v štandardnom režime (Smith et al., 1998).

## 4.6 Sotware pre spracovanie a vizualizáciu dát

Pre spracovanie dát a ich vizualizáciu bolo v 90% prípadov použité prostredie IDL (Interactive Data Language) od firmy ITT, zvyšných 10% software bolo implementované v prostredí Borland Delphi 2006. Veľké množstvo rutín pre štatistickú štúdiu dát ako aj pre prípadové štúdie bolo vyvinutých v rámci dizertačnej práce. Pre umožnenie rýchlej vizualizácie závislostí koncentrácie a teploty boli dáta (obsahujúce teploty a koncentrácie) z družíc Interball-1 a THEMIS prevedené do MySQL databázy a zobrazované špeciálne pre tento účel vyvinutou

grafickou aplikáciou LLBL studio. Pre zobrazovanie elektrónových spektier bol pre družicu Interball-1 použitý program JOB (Jednoduchý Obrázkový Badatel) aktívne vyvíjaný Doc. Lubomírom Přechom a Doc. Ondřejom Santolíkom od roku 1996. Elektrónové a iónové spektrá z projektu THEMIS sme znázorňovali za pomoci aplikácie Themis Data Analysis Software vyvinutej v Berkley, USA.



## Kapitola 5

# Štatistická štúdia polohy a tvaru magnetopauzy

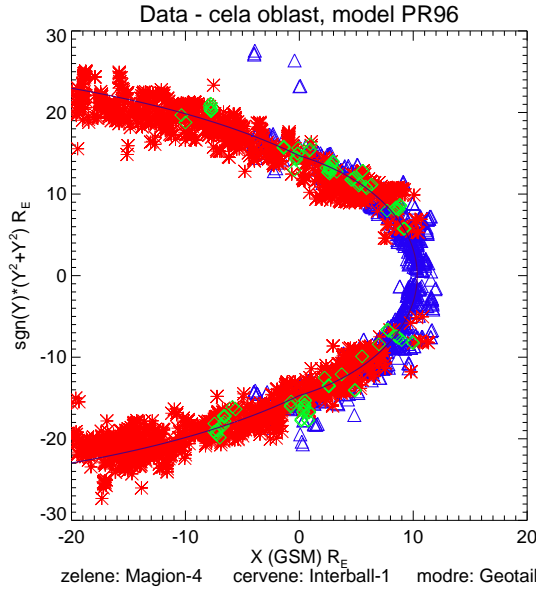
### 5.1 Analýza modelov magnetopauzy

V prácach Dusik (2002), Safrankova et al. (2002)(príloha C1) a Safrankova et al. (2005)(príloha C3) sme študovali ako najčastejšie používané empirické modely magnetopauzy na základe parametrov slnečného vetra vystihujú jej skutočnú polohu a tvar. Porovnávali sme 7 modelov magnetopauzy

- *Formisano et al. (1979)*
- *Sibeck et al. (1991)*
- *Roelof and Sibeck (1993)*
- *Kuznetsov and Suvorova (1996)*
- *Petrinec and Russell (1996)*
- *Shue et al. (1997)*
- *Alexeev et al. (1999)*

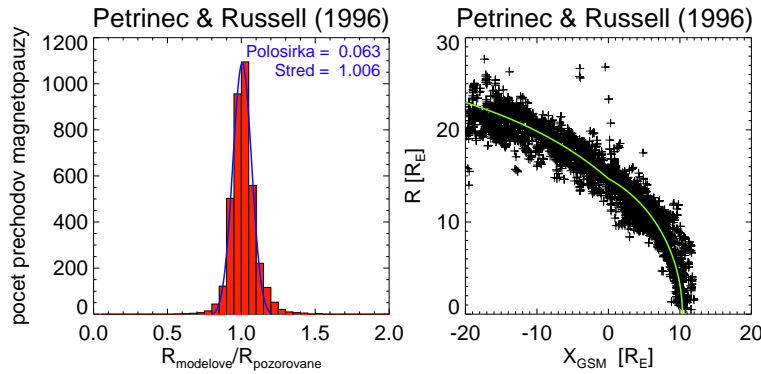
v rôznych oblastiach a pri rôznych podmienkach v slnečnom vetre.

Zdrojom dát bolo 2779 prechodov magnetopauzy družicou Interball-1 v období 8/1995 až 10/1998, 122 prechodov družice Magion 4 z obdobia 3/1996 až 8/1997 a 1354 prechodov družice Geotail z obdobia 1/1995 až 6/1997. Prechody magnetopauzy prebiehali v oblastiach  $X_{GSM} \approx -20 R_E$  až  $X_{GSM} \approx 12 R_E$ , rýchlosť slnečného vetra sa pohybovala v rozmedzí 300 až 700 km/s, koncentrácia častíc od 1 až po  $35 \text{ cm}^{-3}$  a Machovo číslo od 4 do 50. Množina prechodov magnetopauzy obsahovala viacnásobné prechody. Parametre slnečného vetra a magnetického poľa boli získané z družice WIND. Čas šírenia parametrov slnečného vetra z družice WIND k družiciam prelietavajúcim magnetopauzou bol počítaný dvoj-krokovou aproximáciou (bližší popis výpočtu v Safrankova et al. (2002)(príloha C1) resp. Dusik (2002)). Konečné hodnoty parametrov slnečného vetra boli určené ako 5 minútové priemery okolo



Obr. 5.1: Priestorové rozdelenie analyzovaných prechodov magnetopauzy. Polohy pozorovaných prechodov boli normalizované k modelovej ploche modelu Petrinec and Russell (1996). Znázornené prechody magnetopauzou obsahujú reťazce viacnásobných prechodov. Zelené body sú zaznamenané prechody magnetopauzy z družice Magion 4, červené body z družice Interball-1 a modré body z družice Geotail.

stanoveného času prechodu magnetopauzou. Znázornenie všetkých analyzovaných prechodov magnetopauzy normalizovaných k ploche magnetopauzy modelu Petrinec and Russell (1996) je na obrázku 5.1.



Obr. 5.2: Štatistická štúdia presnosti modelu magnetopauzy (príklad pre model Petrinec and Russell (1996)). Ľavá časť obrázku znázorňuje histogram pomerov  $R_{mod}/R_{obs}$  preložených Gaussovou krivkou. Pravá časť obrázku znázorňuje polohu pozorovaných prechodov magnetopauzy normovaných na dynamický tlak slnečného vetra a IMF  $B_Z$ . Preložené krivky reprezentujú modelovú magnetopauzu za normálnych podmienok v slnečnom vetre ( $p_{sw} = 2$  nPa, IMF  $B_Z = 0$  nT).

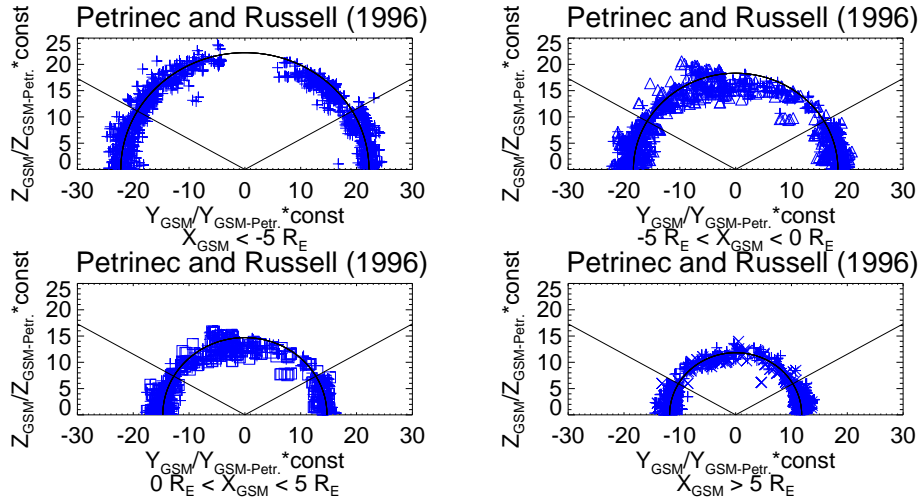
Presnosť jednotlivých modelov určujeme porovnaním modelovej ( $R_{mod}$ ) a pozorovanej ( $R_{obs}$ ) vzdialenosti magnetopauzy od stredu Zeme počítanej pre každý prechod a každý model. Množina pomerov  $R_{mod}/R_{obs}$  je pre každý model zanesená do histogramu a preložená Gaussovou krivkou. Príklad takého histogramu pre model Petrinec and Russell (1996) je v ľavej časti obr. 5.2. Polohy pozorovaných prechodov magnetopauzy v aberovaných GSM súradniciach normovaných na modelovú plochu s tzv. normálnym dynamickým tlakom slnečného vetra ( $p_{sw} = 2$  nPa) a nulové IMF  $B_Z$  sú znázornené v pravej časti obrázku 5.2. Porovnanie presností jednotlivých modelov pre všetky prechody magnetopauzou je v tabuľke 5.1.

Model	Pološírka	Stred
Formisano et al. (1979)	0,073	0,978
Sibeck et al. (1991)	0,076	1,006
Roelof and Sibeck (1993)	0,075	1,007
Kuznetsov and Suvarova (1996)	0,096	0,954
Petrinec and Russell (1996)	0,063	1,006
Shue et al. (1997)	0,087	1,007
Alexeev et al. (1999)	0,087	1,100

Tab. 5.1: Porovnanie presnosti modelov magnetopauzy pre všetky prechody magnetopauzou (bez rozlíšenia oblastí a parametrov slnečného vetra).

Modely sme ďalej porovnávali pre prísnečnú a chvostovú oblasť, sledovali sme rozdiely medzi rannou a nočnou stranou magnetosféry, zisťovali sme vplyv orientácie magnetického poľa a vplyv veľkosti dynamického tlaku slnečného vetra. Výsledkom je, že modely Petrinec and Russell (1996), Roelof and Sibeck (1993), Sibeck et al. (1991) a Shue et al. (1997) sú porovnateľne presné v skúmaných oblastiach  $-20 R_E \leq X_{GSM} \leq 12 R_E$  a podmienkach v slnečnom vetre ( $0,5 \text{ nPa} \leq p_{sw} \leq 6 \text{ nPa}$ ) a ( $-7 \text{ nT} \leq B_Z \leq +9 \text{ nT}$ ). Ak vezmeme do úvahy sledované pološírky a stredy zmieňovaných Gaussových kriviek, najlepšie predpovede dáva model Petrinec and Russell (1996). Porovnaním modelu Shue et al. (1997) s ostatnými sme zistili, že vplyv slnečného vetra na polohu magnetopauzy je lepšie vystihnutý vzťahom  $p_{sw}^{-6}$  ako  $p_{sw}^{-6,6}$  uvádzaným v tomto modeli. Všetky sledované modely s výnimkou Alexeev et al. (1999) mierne podhodnocujú vplyv efektu orientácie IMF  $B_Z$ , pričom toto tvrdenie platí pre obidve orientácie magnetického poľa, i keď presnejšie predpovede polohy magnetopauzy predpokladajú pre južné IMF.

Zvláštnu pozornosť sme venovali rozdeleniu prechodov magnetopauzy podľa geomagnetických šírok. Nakoľko neexistuje presná definícia nízkych a vysokých geomagnetických šírok, hranicu medzi týmito oblasťami sme vzali uhol  $30^\circ$ . Za prechody magnetopauzy vo vysokých šírkach považujeme tie, ktoré spĺňajú nasledovný vzťah pre polohu  $Y_{GSM}$  a  $Z_{GSM}$ :



Obr. 5.3: Projekcia pozorovaných prechodov magnetopauzy do okolia modelovej plochy magnetopauzy pre model Petrinec and Russell (1996). Horné panely zodpovedajú nočnej strane magnetosféry, dolné dennej strane. Postranné rozdeľujúce úsečky oddeľujú vysoké a nízke geomagnetické šírky.

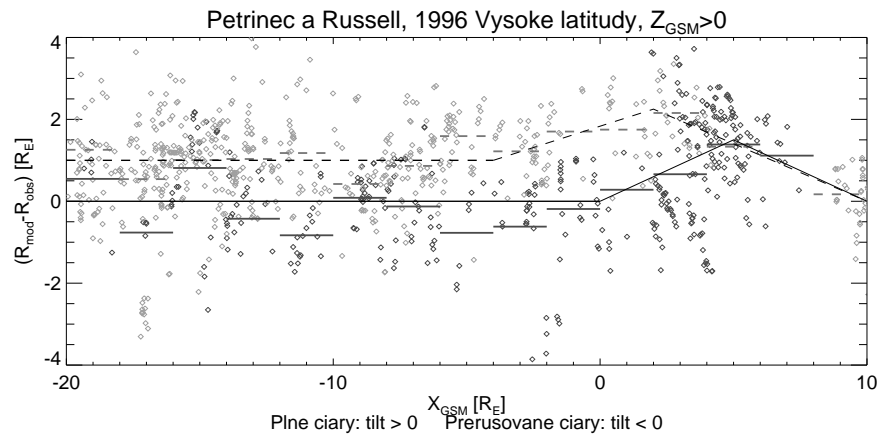
$$\arctg \frac{Z_{GSM}}{Y_{GSM}} > 30^\circ. \quad (5.1)$$

Oblasti s uhlom  $< 30^\circ$  považujeme za nízke geomagnetické šírky.

### 5.1.1 Tvar a poloha magnetopauzy vo vysokých geomagnetických šírkach

Ako je vidieť z obr. 5.3, magnetopauza je v skutočnosti sploštenejšia oproti predpovediam modelov. Toto sploštenie (vhlbenie) je ovplyvňované tilt uhlom zemského dipólu. Pravdepodobným zdrojom vhlbenia je magnetosférický kasp. Naše dáta ukazujú podobné vhlbenie pre kladné aj záporné hodnoty tiltu (obrázok 5.4), kým Eastman et al. (2000) predpokladá, že ak je dipól naklonený smerom od Slnka, vhlbenie je menšie. Jeho výsledky sú však založené na dátach družice Hawkeye, ktorá nemerala tak dôkladne oblasti kaspu pre záporné tilt uhly, ako družica Interball-1. Vhlbenie je pozorované vo vysokých šírkach v rozmedzí  $X_{GSM}$  súradníc ( $-2 R_E \leq X_{GSM} \leq 8 R_E$ ). Priemerné vhlbenie bolo  $\approx 2,5 R_E$ , no výnimkou neboli ani odchýlky modelov  $4 R_E$ . Poloha a veľkosť vhlbenia sú v kvantitatívnej zhode s Sotirelis and Meng (1999) ako aj s výsledkami Sibeck et al. (1991).

Pre účely zlepšenia predpovedí polohy magnetopauzy modelu Petrinec and Russell (1996) sme v práci Safrankova et al. (2005)(príloha C3) previedli korekciu tohoto modelu odčítaním hodnoty  $\Delta R$  od vypočítanej modelovej vzdialenosti magnetopauzy. Veľkosť hodnoty  $\Delta R$  určujeme pomocou aproximačných úsečiek znázornených na obrázku 5.4. Konkrétny výpočet hodnôt v závislosti na polohe a znamienku tilt uhla je v tabuľke 5.2. Modifikovaný



Obr. 5.4: Rozdelenie relatívnych odchýliek pozorovaných prechodov magnetopauzy od predpovedí modelu Petrinec and Russell (1996) pozdĺž osy  $X_{GSM}$  a spôsob odčítania závislosti na tilt uhle.

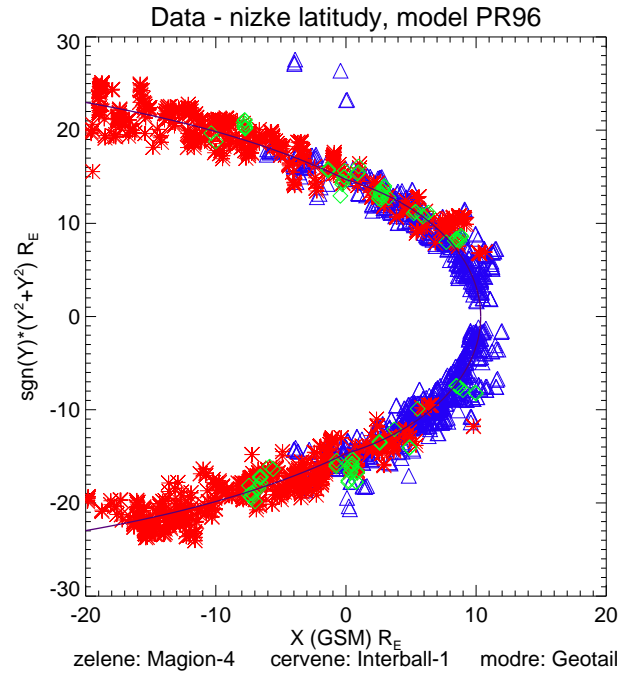
model Petrinec and Russell (1996) poskytuje oproti pôvodnému modelu presnejšie predpovede polohy magnetopauzy v oblasti magnetosférických kaspov.

Kladný tilt		Záporný tilt	
Rozsah $X_{GSM}$	Výpočet $\Delta R$	Rozsah $X_{GSM}$	Výpočet $\Delta R$
$X < 0$	$\Delta R = 0$	$X < -4$	$\Delta R = -1$
$0 < X < 5$	$\Delta R = -0,28 \times X$	$-4 < X < 2$	$\Delta R = -0,2 \times X - 1,8$
$5 < X < 10$	$\Delta R = 0,28 \times X - 2,8$	$2 < X < 10$	$\Delta R = -0,275 \times X - 2,75$
$X > 10$	$\Delta R = 0$	$X > 10$	$\Delta R = 0$

Tab. 5.2: Určenie korekčného parametra  $\Delta R$  v závislosti na  $X_{GSM}$  a na tilt uhle.

### 5.1.2 Tvar a poloha magnetopauzy v nízkych geomagnetických šírkach

Porovnanie modelov magnetopauzy v Safrankova et al. (2002)(príloha C1) a Safrankova et al. (2005)(príloha C3) bolo prevedené pre rôzne podmienky v slnečnom vetre a rôzne oblasti, pričom dôraz sa kládol na oblasť vysokých geomagnetických šírok. Vzhľadom k cieľu študovať hraničnú vrstvu v nízkych šírkach (LLBL) sme sa v práci Dusik et al. (2003)(príloha C2) rozhodli bližšie štatisticky preskúmať prechody magnetopauzy v nízkych geomagnetických šírkach. Naše dáta obsahovali 2354 prechodov magnetopauzy v nízkych šírkach (104 - Magion, 1090 Interball a 1160 Geotail) v rozsahu  $(-20 R_E \leq X_{GSM} \leq 12 R_E)$ , ktoré sú zobrazené na obr.5.5. Ako plynie z tabuľky 5.3, priemerný tvar a polohu magnetopauzy v nízkych šírkach opäť najlepšie vystihuje model Petrinec and Russell (1996). Je však nutné poznamenať, že distribúcia odchýliek pozorovaných prechodov magnetopauzy od modelovej plochy je pomerne široká. Za týmto faktom je možné nájsť viacero príčin, z ktorých sme sa

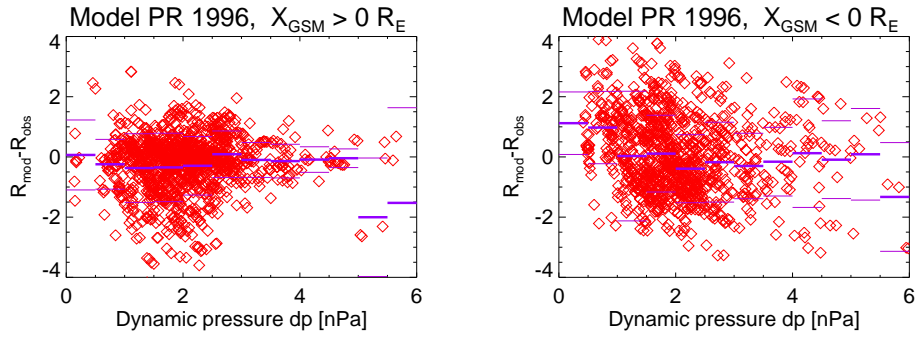


Obr. 5.5: Priestorové rozdelenie analyzovaných prechodov magnetopauzy v nízkych geomagnetických šírkach ( $\arctg \frac{Z_{GSM}}{Y_{GSM}} < 30^\circ$ ). Polohy pozorovaných prechodov boli normalizované k modelovej ploche modelu Petrinec and Russell (1996). Znázornené prechody magnetopauzou obsahujú reťazce viacnásobných prechodov. Zelené body sú zaznamenané prechody magnetopauzy z družice Magion 4, červené body z družice Interball-1 a modré body z družice Geotail.

rozhodli bližšie preskúmať vplyv dynamického tlaku slnečného vetra, vplyv fluktuácií parametrov slnečného vetra ako aj možný vplyv lokálneho magnetického strihu (z angl. local magnetic shear) a orientácie IMF.

Model	Pološírka	Stred
Formisano et al. (1979)	0,070	0,971
Sibeck et al. (1991)	0,075	0,972
Roelof and Sibeck (1993)	0,064	0,973
Kuznetsov and Suvarova (1996)	0,087	0,927
Petrinec and Russell (1996)	<b>0,060</b>	<b>0,994</b>
Shue et al. (1997)	0,072	0,985
Alexeev et al. (1999)	0,074	1,070

Tab. 5.3: Porovnanie presnosti modelov magnetopauzy v nízkych šírkach. Najužšie a najvycentrovanejšie distribúcie odchýliek modelu od pozorovaní predstavuje model Petrinec and Russell (1996).



Obr. 5.6: Vplyv dynamického tlaku slnečného vetra  $p_{sw}$  na polohu magnetopauzy. Ľavý panel znázorňuje dennú oblasť ( $X_{GSM} > 0$ ), pravý panel znázorňuje nočnú oblasť ( $X_{GSM} < 0$ ). Výrazné čiary sú strednými hodnotami rozdielov medzi modelovou a pozorovanou vzdialenosťou magnetopauzy. Tenšie čiary sú štandardnými odchýlkami.

### Závislosť na dynamickom tlaku slnečného vetra

Dynamický tlak slnečného vetra  $p_{sw}$  je jedným zo vstupných parametrov modelu Petrinec and Russell (1996). Na obrázku 5.6 je pre nočnú magnetopauzu ( $X_{GSM} < 0$ ) viditeľná systematická odchýlka pre veľmi malé dynamické tlaky. Táto odchýlka môže dosahovať hodnotu  $1 R_E$ . Pre dennú magnetopauzu ( $X_{GSM} > 0$ ) nie je viditeľná žiadna závislosť odchýliek polôh na dynamickom tlaku. Vzhľadom k pomerne malému počtu prechodov magnetopauzy pri veľmi malých tlakoch sa k problematike vrátíme neskôr v kapitole 5.1.3.

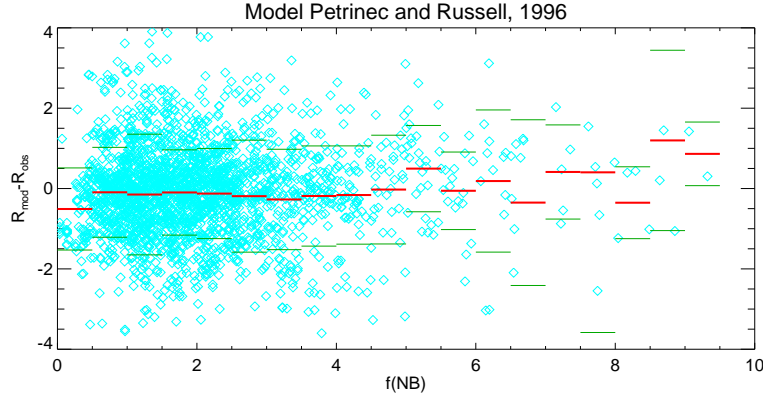
### Vplyv fluktuácií parametrov slnečného vetra

Porovnanie modelov magnetopauzy s pozorovaniami naráža na principiálny problém v presnosti určenia vstupných parametrov. Tieto sú väčšinou získané z meraní vzdialených sond - monitorov a posunuté o vypočítaný čas získaný z nameranej rýchlosti slnečného vetra a rozdielov polôh monitoru a družice prelietavajúcej skúmanou oblasťou - napr. magnetopauzou. Okrem toho, spriemerovanie či malé časové rozlíšenie vstupných parametrov môže viesť k vyhladzovaniu zmien ovplyvňujúcich tvar a polohu magnetopauzy. Na to, aby sme sa pokúsili odhadnúť veľkosť možných chýb zanesených do vstupných parametrov či už nepresne vypočítaným časovým posunom, prípadne fluktuáciou parametrov definujeme kvantitatívnu funkciu  $f(NB)$  nasledujúcim výrazom

$$f(NB) = \frac{1}{2}\Delta N + \frac{1}{6}(\Delta B_x + \Delta B_y + \Delta B_z), \quad (5.2)$$

kde  $\Delta$  predstavuje rozdiel medzi maximálnou a minimálnou koncentráciou častíc slnečného vetra (meranou v  $cm^{-3}$ ) a komponentami medziplanetárneho magnetického poľa (meranými v  $nT$ ) na 30 minútovom intervale stredovanými okolo určeného času prechodu magnetopauzou. Predpokladali sme, že prechody magnetopauzy pozorované pri relatívne

stálych podmienkach v slnečnom vetre, ktoré nebudú veľmi ovplyvnené časovaním ani priemerovaním, budú vykazovať menšie odchylky od modelovej plochy, ako prechody pozorované za výrazne sa meniacich parametrov.



Obr. 5.7: Odchylky medzi pozorovanou s modelovou polohou magnetopauzy v závislosti na fluktuáciách vstupných parametrov  $p_{sw}$  a IMF  $B_Z$  definovaných funkciou  $f(NB)$  (vzťah 5.2) pre model Petrinec and Russell (1996).

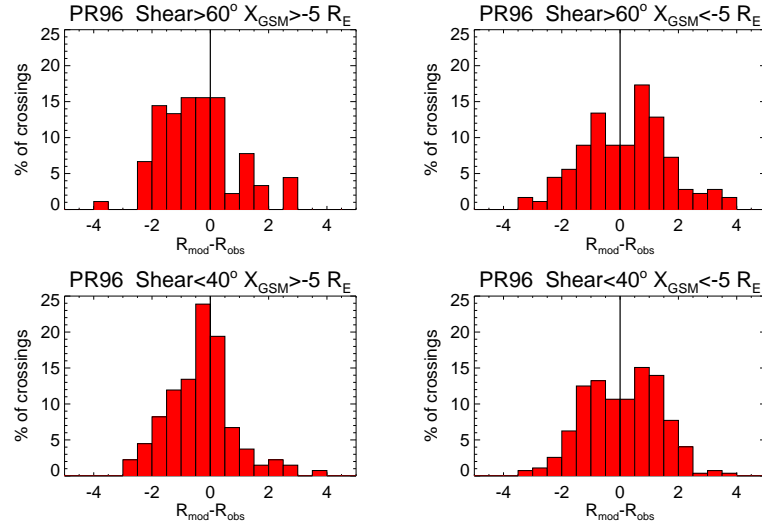
Ako vidíme z obrázku 5.7, rozptyl pozorovaných polôh magnetopauzy od očakávaných je veľký (väčší ako  $1 R_E$ ) aj pre prakticky sa nemeniace hodnoty vstupných parametrov (malé  $f(NB)$ ). Z toho vyplýva, že fluktuácie parametrov slnečného vetra nie sú podstatnou príčinou odchýliek pozorovaných polôh magnetopauzy oproti modelom.

### Vplyv IMF, magnetický strih

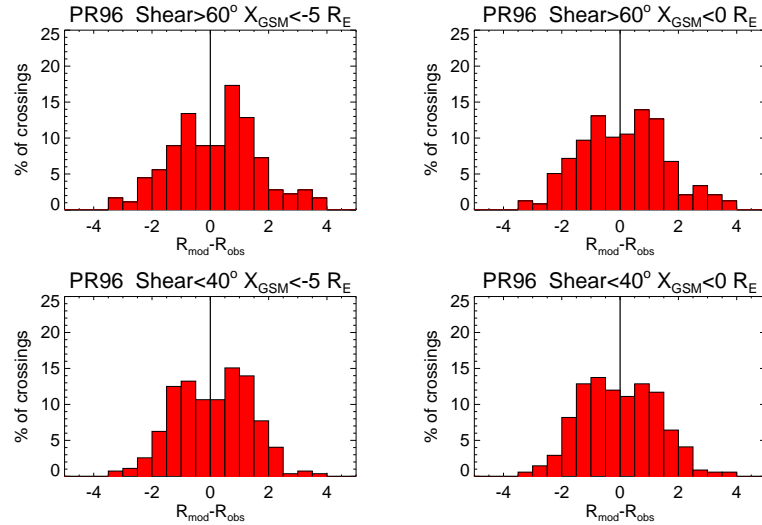
Správanie sa vrstvy LLBL a magnetopauzy v nízkych šírkach pri rôznych orientáciách IMF sme študovali v rámci Dusik et al. (2005). Závislosť polohy magnetopauzy na z-ovej komponente IMF, s ktorou model Petrinec and Russell (1996) počíta, je vo väčšine prípadov prisudzovaná prepojeniu magnetického poľa v prislnečnej oblasti pre južné IMF alebo v oblasti kaspu pre severné IMF. Keďže v prechodovej oblasti dochádza k zmenám medziplanetárneho magnetického poľa a magnetosférické magnetické pole má zas rôznu orientáciu v rôznych oblastiach, rozhodli sme sa pre analýzu využiť hodnoty tzv. lokálneho magnetického strihu (local magnetic shear) pozdĺž magnetopauzy. Veľký magnetický strih znamená zvýšenú pravdepodobnosť lokálneho prepojenia magnetických siločiar, ktoré rozruší magnetopauzu. Dá sa očakávať, že magnetopauza bude bližšie k Zemi ako v opačnom prípade. Magnetický strih sme vypočítali ako uhol medzi dvoma vektormi magnetického poľa a to vektorom zmeraným 2 minúty pred a 2 minúty po jednotlivých prechodoch magnetopauzy. Magnetický strih môže dosiahnuť hodnôt 0 až  $180^\circ$ . V tejto časti štúdie sme použili len dáta z družice Interball-1. Podarilo sa nám určiť hodnoty magnetického strihu pre 761 z celkového počtu 1090 prechodov magnetopauzy. Množinu vypočítaných magnetických strihov sme roz-



delili na 2 skupiny: strih  $< 40^\circ$  a strih  $> 60^\circ$  s úmyslom rozdeliť dáta s malým a veľkým magnetickým strihom.

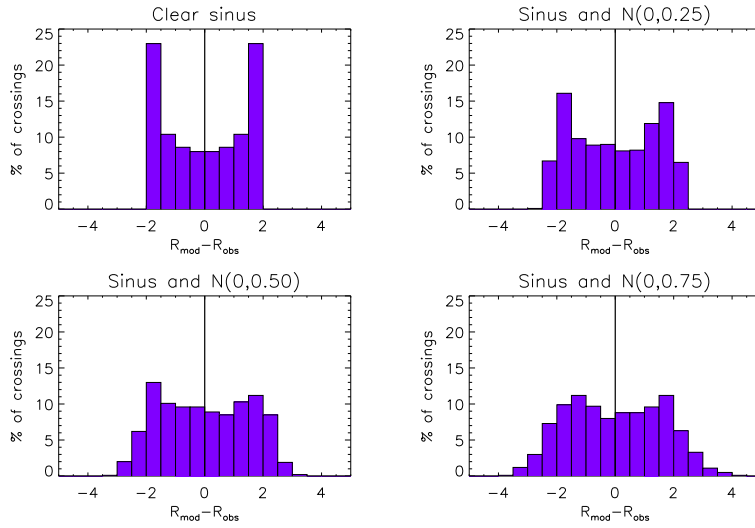


Obr. 5.8: Histogramy prechodov magnetopauzy družicou Interball-1. Dáta sú rozdelené do 4 oblastí podľa veľkosti lokálneho magnetického strihu a polôh  $X_{\text{GSM}}$ .

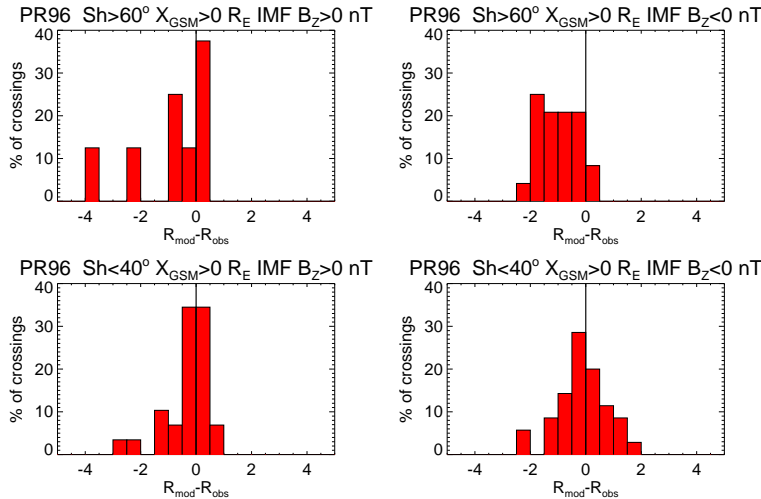


Obr. 5.9: Histogramy prechodov magnetopauzy družicou Interball-1 pre bližšiu a vzdialenejšiu chvostovú oblasť. Je sledovaná závislosť na lokálnom magnetickom strihu.

Z obrázku 5.8 vidíme, že magnetopauza je systematicky bližšie k Zemi v oblasti  $X_{\text{GSM}} > -5 R_E$ , no závislosť na strihu nie je silná. Na druhej strane sa ukazuje, že neurčitosť v určení polohy magnetopauzy sa s rastúcim magnetickým strihom zväčšuje. V oblasti  $X_{\text{GSM}} < -5 R_E$  zaznamenávame v histograme 2 maximá. Pri zobrazení samotnej nočnej strany (5.9) sa ukazuje, že píky maxim sú výraznejšie pre vzdialenejšie prechody magnetopauzou (menšie



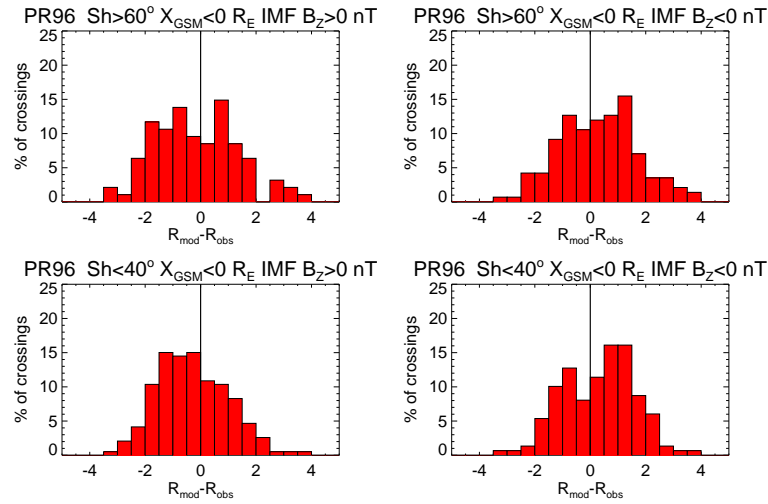
Obr. 5.10: Numerický model: fiktívne polohy magnetopauzy so sínusovým rozdelením s amplitúdou  $2 R_E$  (ľavý horný panel) a s pridanou náhodnou komponentou pohybu magnetopauzy s veľkosťou 0,25 až 0,75  $R_E$  (zvyšné panely).



Obr. 5.11: Histogramy prechodov magnetopauzy družicou Interball-1 pre prislnečnú oblasť. Dáta sú rozdelené do 4 panelov podľa veľkosti lokálneho magnetického strihu a orientácie IMF  $B_z$ .

hodnoty  $X_{GSM}$ ). Vzdialenosť maxím v histograme ukazuje na typickú amplitúdu vln na magnetopauze v intervale 1 až  $2 R_E$ .

Predpokladáme, že toto rozdelenie môže byť výsledkom periodického pohybu magnetopauzy (vlny na magnetopauze) v kombinácii s "náhodnými" fluktuáciami. Za účelom určenia typickej amplitúdy vlny na magnetopauze a náhodnej zložky fluktuácií sme previedli jednoduchý numerický model. Vyrobiti sme množinu fiktívnych prechodov magnetopauzy so



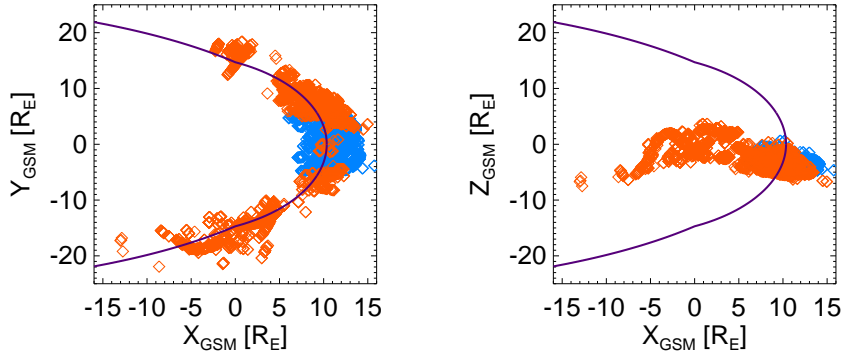
Obr. 5.12: Histogramy prechodov magnetopauzy družicou Interball-1 pre chvostovú oblasť. Dáta sú rozdelené do 4 panelov podľa veľkosti lokálneho magnetického strihu a orientácie IMF  $B_Z$ .

sínusovým rozdelením odchýliek od modelovej magnetopauzy s amplitúdou odchýliek rovnou  $2 R_E$ . Tieto sme zanesli do histogramu (ľavý horný panel obrázku 5.10). K týmto fiktívnym polohám magnetopauzy sme postupne pridávali Gaussovský šum s hodnotami 0,25, 0,50 a 0,75  $R_E$  (histogramy z toho vytvorené sú znázornené v pravom hornom a dolných paneloch obr. 5.10). Z porovnania panelov tohoto numerického modelu s reálne nameranými hodnotami (obr. 5.9) vidíme určitú podobnosť. Z toho usudzujeme, že kváziperiodický pohyb magnetopauzy v nízkych šírkach je pravdepodobnou vlastnosťou tejto oblasti. Zdrojmi tohoto pohybu by mohli byť vnútorná nestabilita, fluktuácie slnečného vetra resp. fluktuácia tlaku v prechodovej oblasti.

Vzhľadom k orientácii magnetosférického magnetického poľa je lokálny magnetický strih v prislnečnej oblasti úzko spojený s IMF  $B_Z$ , pričom na tejto komponente závisí aj miesto, kde dochádza k prepojovaniu magnetických polí. Z tohoto dôvodu sme sa rozhodli rozdeliť dáta z Interballu-1 so spočítaným strihom do štyroch oblastí so severným a južným IMF a veľkým a malým magnetickým strihom. Dáta sme rozdelili na prislnečnú  $X_{GSM} > 0$  a chvostovú  $X_{GSM} < 0$  oblasť. Pre prislnečnú oblasť (obr. 5.11) pozorujeme, že model v prípadoch pre IMF  $B_Z > 0$  nezávisle na strihu predpovedá polohu magnetopauzy oproti pozorovaniám bližšie k Zemi. V prípade záporného IMF  $B_Z$  a malého magnetického strihu je rozdelenie približne symetrické. Vzhľadom k malému počtu dát, ktoré sme mali k dipozícii pre prislnečnú oblasť sú výsledky tejto štatistiky nepriekazné. Pre chvostovú oblasť je situácia znázornená na obrázku 5.12. Vidíme, že model Petrinec and Russell (1996) pre IMF  $B_Z > 0$  predpokladá polohu magnetopauzy trochu bližšie, ako je v skutočnosti a pre IMF  $B_Z < 0$  zase trochu ďalej oproti realite. Efekt posunu predpovedanej polohy magnetopauzy oproti skutočnosti je silnejší pre nižší magnetický strih.

### 5.1.3 Prislnečná oblasť v období slnečného minima v rokoch 2007-2008.

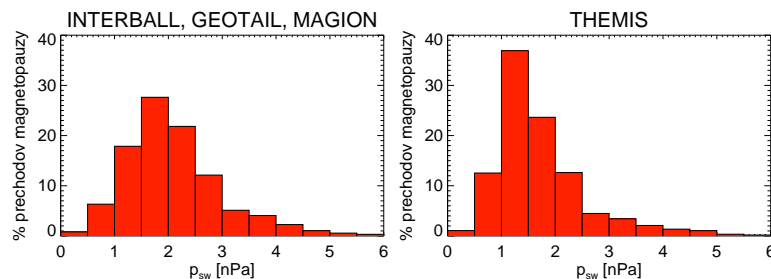
Údaje z družíc Geotail, Interball a Magion neobsahovali vzhľadom k ich dráham letu dostatočne veľké množstvo dát (263 prechodov) pre štúdium prechodov magnetopauzy v prislnečnej oblasti. Misia Themis, ktorá poskytuje početné merania v prislnečnej oblasti umožnila doplnenie pôvodnej štúdie prechodov magnetopauzy z družíc Interball-1, Magion 4 a Geotail. Táto krátka štúdia je obsahom práce Dusik et al. (2010)(príloha C6).



Obr. 5.13: Projekcia prechodov magnetopauzy družicami projektu THEMIS z obdobia 6/2007 až 8/2008 do rovín XY (ľavý panel) a XZ (pravý panel). Modré body reprezentujú prechody magnetopauzy v oblasti  $X_{GSM} > 5$ ,  $-5 < Y_{GSM} < 5$ ,  $-5 < Z_{GSM} < 5$ . Červené body sú zvyšné. Fialová krivka je plocha modelu Petrinec and Russell (1996) pre IMF  $B_Z = 0$  nT a  $p_{sw} = 2$  nPa.

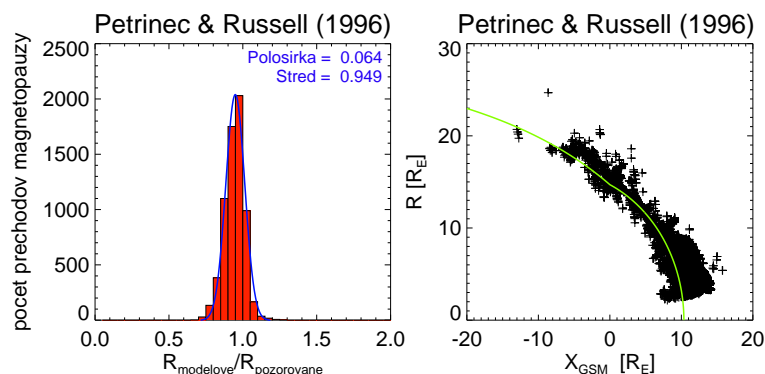
Prechody magnetopauzy z družíc Themis boli identifikované vizuálne na základe plazmatických momentov, iónových a elektrónových spektier (McFadden et al., 2008) a magnetického poľa (Auster et al., 2008) s maximálnym časovým rozlíšením. Celkovo súbor obsahoval 6649 prechodov magnetopauzy, pre ktoré sú k dispozícii zároveň dáta zo slnečných monitorov (plazmatické dáta z družice Wind (Ogilvie et al., 1995), magnetické polia z družice ACE (Smith et al., 1998)). Tento, menej bežný spôsob určovania vstupných parametrov sme použili z dôvodu, že plazmatické dáta z družice ACE často chýbajú a naopak magnetické pole z družice Wind v rokoch 2007 a 2008 vykazuje chybu  $\sim 1$  nT v zložke  $B_Z$ , ktorá je pre nás často podstatná. Priestorové znázornenie prechodov magnetopauzy je na obrázku 5.13. Data sme rozdelili na prislnečnú oblasť v nízkych geomagnetických šírkach  $X_{GSM} > +5 R_E$ ,  $|Y_{GSM}| < 5 R_E$ ,  $|Z_{GSM}| < 5 R_E$  označené modrou farbou a všetky ostatné (označené červeno). V ďalšom texte tejto podkapitoly ako aj v príslušných obrázkoch budeme modro označené prechody magnetopauzy pre jednoduchosť volať prislnečné a červeno označené flank (i keď sem padne aj určitá časť bodov s vysokých latítud s kladným znamienkom  $X_{GSE}$ ).

Pôvodný súbor prechodov magnetopauzy z rokov 1995 až 1998 (do roku 1996) ako aj súbor prechodov z družice Themis sa odohrával v období slnečného minima, ktoré je charakteristické okrem iného priemerne nižšími hodnotami dynamického tlaku slnečného vetra. Na



Obr. 5.14: Porovnanie rozdelenia dynamického tlaku slnečného vetra pre pôvodný súbor prechodov magnetopauzy z obdobia 1/1995 až 10/1998 z družíc Magion 4, Interball 1 a Geotail (panel vľavo) so súborom prechodov magnetopauzy z obdobia 6/2007 až 8/2008 z družíc Themis A až E (panel vpravo). Dynamický tlak bol vo všetkých prípadoch meraný slnečným monitorom WIND.

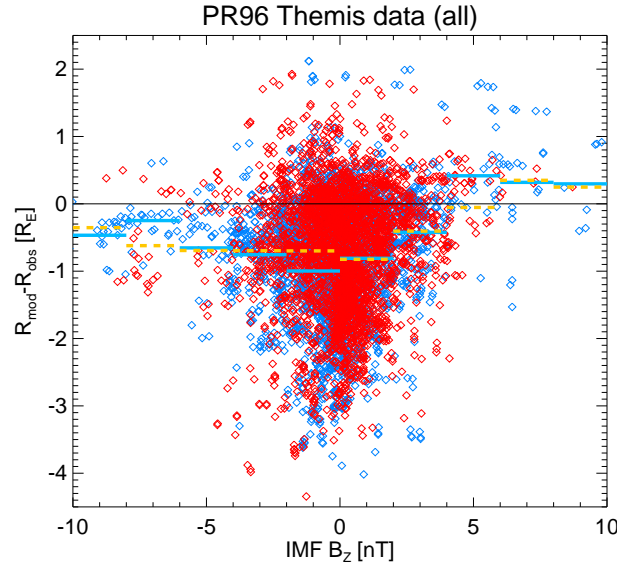
obrázku 5.14 je porovnanie nameraných dynamických tlakov v dobe prechodu magnetopauzy pre tieto dva súbory. Z obrázka je patrné, že v období merania Themisu boli merané tlaky nižšie, ako v období meraní Interballu atď. Súvisí to zrejme s tým, že v rokoch 2007-2008 sme sa nachádzali v strede mimoriadne výrazného a dlhého slnečného minima, ktoré pretrvávalo ešte počas roka 2009.



Obr. 5.15: Štatistická štúdia presnosti modelu magnetopauzy pre data z družíc Themis A až E a model Petrinec and Russell (1996). Ľavá časť obrázku znázorňuje histogram pomerov modelových a pozorovaných vzdialeností magnetopauzy preložených Gaussovou krivkou. Pravá časť obrázku znázorňuje polohu pozorovaných prechodov magnetopauzy normovaných na dynamický tlak slnečného vetra a IMF  $B_Z$ . Preložené krivky reprezentujú modelovú magnetopauzu za normálnych podmienok v slnečnom vetre ( $p_{sw} = 2$  nPa, IMF  $B_Z = 0$  nT)

Pri znázornení presnosti predpovedí modelu Petrinec and Russell (1996) na pravej strane obrázku 5.15 a porovnaní s obrázkom 5.2 vidíme prekvapivú vec. Model vykazuje pomerne výrazné odchylky od meraných hodnôt najmä pre oblasť v blízkosti subsolárneho bodu. Táto skutočnosť je patrná aj z Gaussovského fitu (ľavá strana obr. 5.15), kde vidíme výraznejší

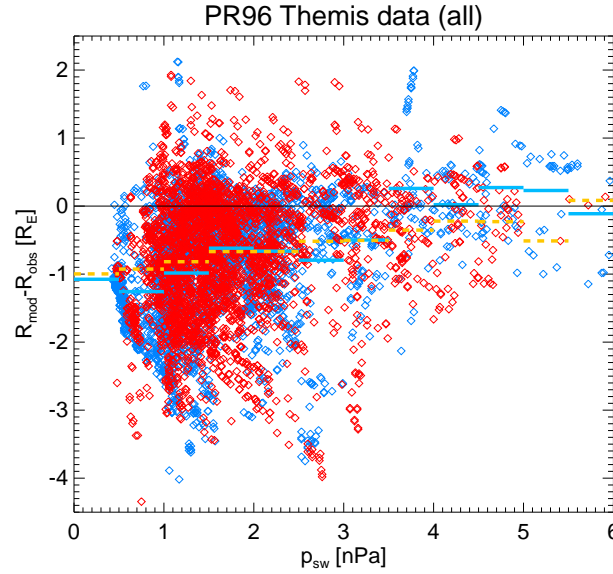
posun stredu krivky. Model vo veľkej časti prípadov očakáva magnetopauzu bližšie k Zemi, ako je v skutočnosti. Takisto ostatné modely (detailné porovnania v práci neuvádzame) vykazujú podobný posun, pričom odchyľky sú ešte výraznejšie. V pôvodnom súbore dát z družíc Interball-1, Magion 4 a Geotail pochádzali prechody magnetopauzy z prislnečnej oblasti najmä z družice Geotail. Jeho dráha sa v študovanom období periodicky menila a v niektorých mesiacoch nepresahovala vzdialenosť  $11 R_E$ . To by mohol byť jeden z dôvodov, prečo na obrázku 5.2 prakticky nevidíme prechody magnetopauzy za touto hranicou.



Obr. 5.16: Závislosť rozdielu modelových a pozorovaných polôh magnetopauzy na IMF  $B_Z$ . Modré body sú prechody magnetopauzy z oblasti  $X_{GSM} > +5 R_E, |Y_{GSM}| < 5 R_E, |Z_{GSM}| < 5 R_E$ . Červené body sú zvyšné prechody magnetopauzy mimo vytýčenej oblasti. Široké vodorovné čiarky sú strednými hodnotami.

Model Petrinec and Russell (1996) obsahuje závislosť na  $p_{sw}$  a IMF  $B_Z$ . Pokúsili sme sa preto znázorniť odchyľku modelu v závislosti na týchto parametroch. Na obrázku 5.16 vidíme rozdiel modelových a pozorovaných polôh magnetopauzy na IMF  $B_Z$ . Z obrázka je patrné, že v oblasti  $-10 \text{ nT} < B_Z < 4 \text{ nT}$  je priemerná odchýlka viac menej konštantná s hodnotou  $\approx 0,5 R_E$ . Pre väčšie hodnoty IMF  $B_Z$  odchýlka spadne na  $\approx -0,3 R_E$ , no počet dát v tejto oblasti je pre štatistické účely malý.

Na obrázku 5.17 sú znázornené rozdiely modelovej a pozorovanej polohy magnetopauzy ako funkcia  $p_{sw}$ . Priemerné hodnoty značené žltou a modrou farbou vykazujú systematickú závislosť na  $p_{sw}$ . Prechody pozorované pri nízkych tlakoch sú zhruba o  $1 R_E$  ďalej od Zeme, ako predpovedá model. Toto pozorovanie platí ako pre prislnečné, tak aj pre flankové body. Zdá sa, že závislosť polohy magnetopauzy na dynamickom tlaku bude v skutočnosti silnejšia, ako bežne očakávaná 6. odmocnina (model Shue et al. (1997) pracuje so 6,6-tou odmocninou, jeho výsledky pre použité dáta z Themisu sú však ešte horšie). Okrem toho sa dá očakávať,



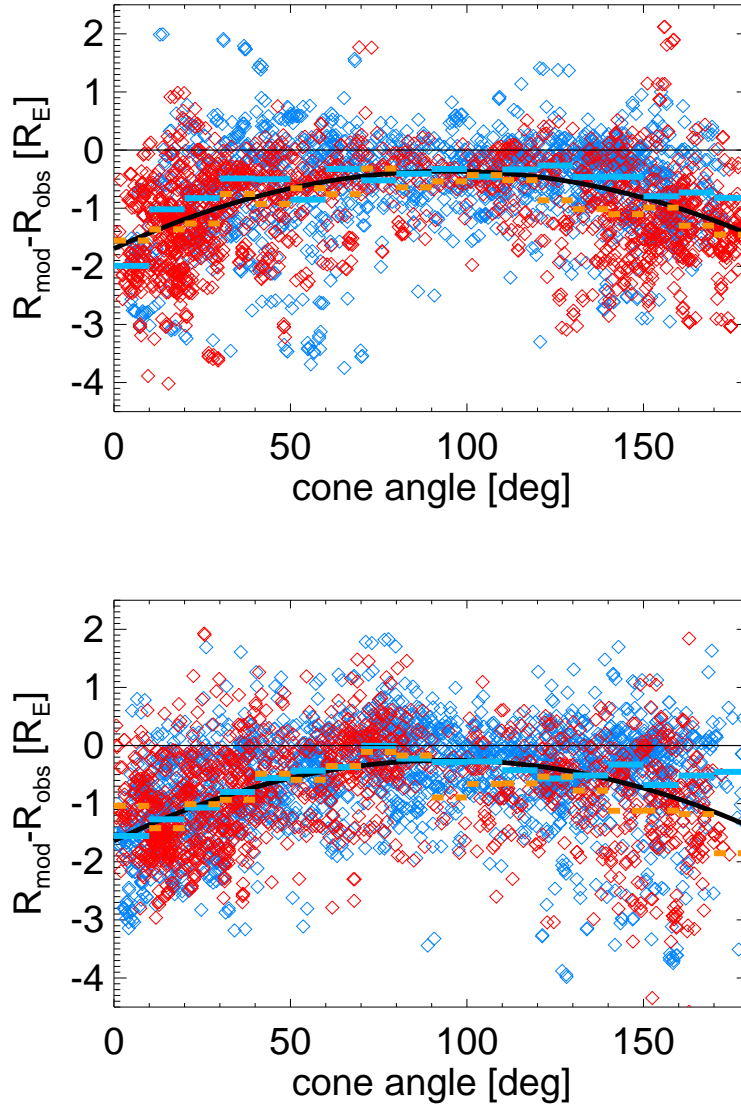
Obr. 5.17: Závislosť rozdielu modelových a pozorovaných polôh magnetopauzy na dynamic-  
kom tlaku slnečného vetra. Význam farieb a vodorovných čiar je rovnaký, ako na obr.5.16.

že pri nízkom  $p_{sw}$  začne mať výraznejší vplyv IMF  $B_Z$ , čo však ešte viac zvýrazní odchýlky modelovej a pozorovanej vzdialenosti magnetopauzy. Vysvetlením prečo sa takáto odchýlka neobjavovala v dátach z družíc Geotail, Interball-1 a Magion 4 z rokov 1995-1998 je s najväčšou pravdepodobnosťou neobvykle nízka hodnota  $p_{sw}$  v rokoch 2007-2008. Na obrázku 5.14 vidíme vrchol tlakov pre dáta z Themisu medzi 1 a 1,5 nPa (priemerná hodnota bola  $\sim 1,4$  nPa), kým v pôvodnom súbore bol priemerný tlak okolo 2 nPa.

Aby sme vzali do úvahy efekty súvisiace z  $p_{sw}$ , rozdelili sme obidve naše podmnožiny dát (prislnečné a flank) do dvoch kategórií podľa dynamického tlaku a to pre  $p_{sw} > 1,4$  nPa a  $p_{sw} < 1,4$  nPa. Na obrázku 5.18 je znázornená závislosť odchýliek modelových ( $R_{mod}$ ) a pozorovaných ( $R_{obs}$ ) vzdialeností magnetopauzy na "cone" uhle. "Cone" uhol je uhol medzi vektorom IMF a vektorom rýchlosti slnečného vetra. Na obidvoch paneloch obrázka 5.18 červené body reprezentujú nízke dynamické tlaky, kým modré body naopak vysoké. Stredné hodnoty tlakov v jednotlivých binoch delených po 10 stupňoch sú znázornené horizontálnymi čiarami príslušných farieb. Horný panel ukazuje distribúciu prislnečných prechodov magnetopauzy, dolný zase distribúciu ostatných prechodov. Čierne krivky sú parabolickým fitom všetkých dát vystihujúcim trend odchýliek. Navzdory veľkému rozptylu experimentálnych bodov môžeme jasne vidieť, že prechody pozorované za radiálneho IMF (pole rovnobežné s vektorom toku slnečného vetra) sú v priemere asi o  $\approx 1 R_E$  vzdialenejšie od Zeme, ako prechody počas magnetického poľa kolmého na vektor rýchlosti toku. Tento trend je pozorovaný pre všetky 4 podmnožiny vytvorené z dát, pričom sa zdá byť silnejší pre malé  $p_{sw}$ .

Predpokladáme, že tento efekt má súvislosť s rôznym spôsobom transformácie  $p_{sw}$  na

## PR96, Themis data, subsolar vs. flank



Obr. 5.18: Závislosť odchýliek modelových polôh magnetopauzy od pozorovaných prechodov na "cone" uhle. Horný panel je pre prechody z prislnečnej oblasti, dolný panel pre zvyšok. Modrou farbou sú označené prechody pre  $p_{sw} > 1,4$  nPa, červenou pre  $p_{sw} < 1,4$  nPa.

tlak predpokladaný na magnetopauze za kváziparalelnou a kváziperpendikulárnou rázovou vlnou. Z tohoto dôvodu sme tiež previedli ploty (nie sú zobrazené) odchýliek modelových a pozorovaných vzdialeností na uhle  $\Theta_{BN}$  (uhol medzi vektorom IMF a normálou k magnetopauze). Zoskupenie dát však bolo menej výrazné, najmä pre flankové dáta. Napriek tomu si myslíme, že transformácia  $p_{sw}$  na rázovej vlně je príčinou väčších odchýliek počas intervalov radiálneho IMF. Ak vezmeme do úvahy tvar prúdnic v prechodovej oblasti (napr. Spreiter et al. (1966)), magnetopauza v skúmanej oblasti je ovplyvňovaná slnečným vetrom



v blízkosti subsolárneho bodu a uhly  $\Theta_{BN}$  a "cone" sú tu zhodné.

Priemerná amplitúda vplyvu "cone" uhla ( $\approx 1 R_E$ ) je menšia, ako vychádza zo štúdií Suvorova et al. (2010) a Jelinek et al. (2010), ale ako vidíme z obrázka 5.18, existuje pomerne veľké množstvo prechodov magnetopauzy ležiacich 3 a viac  $R_E$  od modelovej plochy. Veľký rozptyl bodov môže byť čiastočne pripísaný faktu, že radiálne IMF sa horšie propaguje (napr. Jelinek et al. (2010)) a čiastočne ďalším faktorom, ktoré bude potrebné ďalej analyzovať.



## Kapitola 6

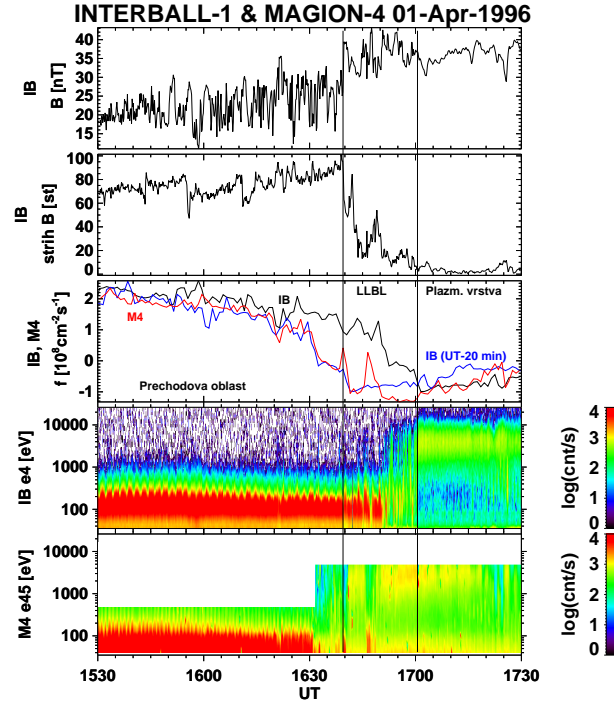
# Štruktúra a vlastnosti vrstvy LLBL

V tejto časti práce sme sa sústredili najmä na profil LLBL - vrstvy, ktorá najviac ovplyvňuje procesy na magnetopauze a tým aj jej polohu a tvar.

### 6.1 Identifikácia LLBL

Identifikácia LLBL je pomerne komplexnou úlohou, nakoľko vyžaduje spoločné vyhodnotenie viacerých parametrov a to magnetického poľa, plazmatického toku, koncentrácie a teploty elektrónov resp. iónov. Najužitočnejším nástrojom pre túto úlohu sú elektrónové a iónové energetické spektrogramy. Na základe zmien plazmatických parametrov a magnetického poľa rozlišujeme 4 oblasti: plazmovú vrstvu (plasma sheet), vnútornú LLBL, vonkajšiu LLBL a prechodovú oblasť (magnetosheath). Plazmová vrstva je charakteristická kľudným magnetickým poľom, nízkou elektrónovou a iónovou koncentráciou a populáciou iónov a elektrónov v hornej časti energetického rozsahu v energetickom spektre. Prechodová oblasť je narozdiel od plazmovej vrstvy charakteristická fluktuujúcim menším magnetickým poľom, vysokou koncentráciou častíc a veľkým plazmatickým tokom a populáciou elektrónov a iónov v dolnej časti rozsahu energetického spektra. V LLBL je možné nájsť zmes nabitých častíc z prechodovej oblasti aj z plazmovej vrstvy. Vonkajšia LLBL obsahuje nízko energetické častice, kým vnútorná je tvorená zmesou nízko aj vysoko energetických častíc podobných koncentrácií.

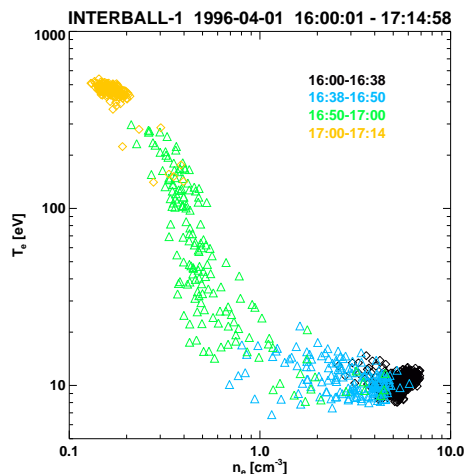
Pre štúdium sme používali dáta z družíc Interball-1 a Magion 4, nakoľko vo svojej dobe to bol jediný experiment, ktorý poskytoval dvojbodové merania. Pre ukážku identifikácie vrstvy LLBL sme si vybrali udalosť z 1.4.1996. Na začiatku vybraného intervalu (obr. 6.1) v čase 15:30 TU sa družica Interball-1 nachádzala na súradniciach  $X_{GSE} = 6,8 R_E$ ,  $Y_{GSE} = 10,6 R_E$ ,  $Z_{GSE} = -4,3 R_E$  (prísnečná oblasť, večerná strana). Vrstva bola pozo-



Obr. 6.1: Príklad preletu družíc Interball-1 a Magion 4 vrstvou LLBL. Panely zhora dole: (Interball-1) veľkosť magnetického poľa, magnetický strih, tok častíc (Magion, Interball, Interball posunutý o 20 minút), energetické spektrum elektrónov z Interballu-1, energetické spektrum elektrónov z Magionu 4.

rovaná jednak družicou Interball-1, tak aj jej subdružicou Magion 4, ktorá sa nachádzala vo vzdialenosti asi  $1 R_E$  ( $\sim 20$  minút) od hlavnej družice. Asi do času 16:38 UT Interball-1 pozoroval prechodovú oblasť (fluktuujúce pole so strednou hodnotou okolo 25 nT, vysoký tok častíc, prevládajúce chladnejšie elektróny). V čase okolo 16:38 družica prechádza magnetopauzou a vstupuje do vrstvy LLBL (magnetické pole skokovo stúpa asi o 10 nT, mení sa magnetický strih (shear), tok častíc pozvoľna klesá a v energetickom spektre sa objavujú elektróny vyšších energií). Krátko po 17:00 UT sa Interball dostáva do plazmovej vrstvy (magnetické pole je veľké a pomerne stabilné, strih sa dostáva k  $0^\circ$ , tok častíc zostáva nízky pričom v spektre prevládajú elektróny vyšších energií). Podobné energetické spektrum ako družica Interball-1 pozoruje aj Magion-4 asi s 20 minútovým predstihom.

Pre štúdium sme využívali n-T ploty popísané podrobne v kapitole 2.4.1. Na obrázku 6.2 je znázornená závislosť elektrónovej teploty na koncentrácii pre dáta z družice Interball-1 pre popisovanú udalosť z 1.4.1996. Je možné jednoznačne identifikovať jednotlivé oblasti, ako magnetosheath s veľkou koncentráciou chladných elektrónov, vonkajšiu LLBL s relatívne konštantnou teplotou a veľkým rozptylom koncentrácií, vnútornú LLBL s relatívne úzkym rozsahom koncentrácií no veľkým rozptylom teplôt až po plazmovú vrstvu, kde je koncentrácia častíc malá, no ich teplota je najvyššia.

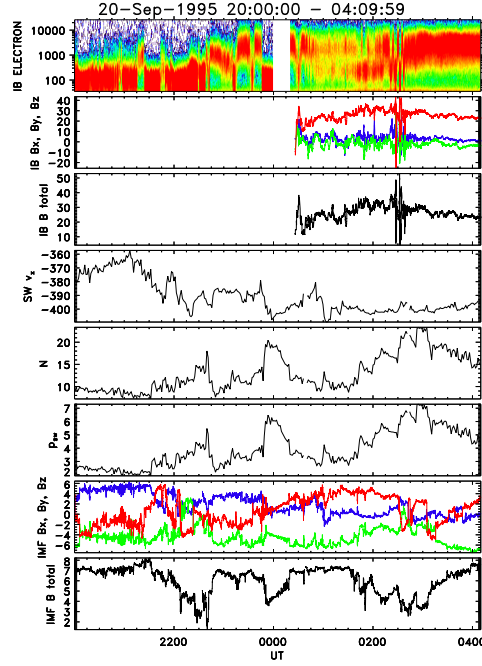


Obr. 6.2: Profil n-T pre príklad preletu LLBL z 1.4.1996. Farebne sú označené oblasti (spolu s časmi), v ktorých sa nachádzala družica Interball-1 (čierna - prechodová oblasť, modrá - vonkajšia LLBL, zelená - vnútorná LLBL, žltá - plazmová vrstva).

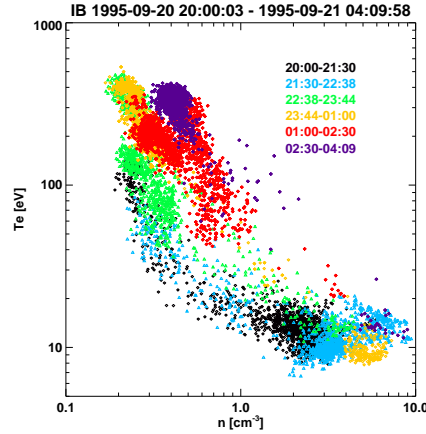
## 6.2 Reakcia LLBL na zmeny v slnečnom vetre

Jedným zo základných problémov pri štúdiu vrstvy LLBL je zistenie, ako táto vrstva reaguje na zmeny podmienok v slnečnom vetre. Z pozorovaní plynie, že zmeny parametrov slnečného vetra sa dajú vo všeobecnosti rozdeliť na 2 typy a to rýchle skokové zmeny a pomalé postupné. Zaujímalo nás, či sa prejaví nejaké rozdielne správanie LLBL pri týchto dvoch typoch zmien parametrov v slnečnom vetre. V nami študovanom sete udalostí sme našli príklad pre veľmi prudko meniacu sa koncentráciu častíc slnečného vetra, ako aj príklad, kde zmeny koncentrácie prebiehali veľmi pozvoľne.

Príklad veľmi prudko meniacich sa podmienok v slnečnom vetre je na obrázku 6.3. Družica Interball-1 sa na začiatku udalosti 20.9.1995 v čase 20:00 UT nachádzala na súradniciach  $X_{GSE} = -6,2 R_E$ ,  $Y_{GSE} = -18,2 R_E$ ,  $Z_{GSE} = 0,6 R_E$  (ranný flank) a pohybovala sa smerom od prechodovej oblasti do magnetosféry. Podmienky v slnečnom vetre merané družicou Wind boli veľmi premenlivé. Koncentrácia častíc slnečného vetra sa menila v rozsahu 9 až  $22 \text{ cm}^{-3}$ , rýchlosť slnečného vetra kolísala v rozmedzí 360 až 420 km/s. Takisto medziplanetárne magnetické pole sa menilo jednak vo veľkosti, jednak v orientácii. Elektronové spektrá (horný panel obr. 6.3) ukazujú niekoľko režimov LLBL, ktoré sme sa snažili presnejšie určiť zakreslením situácie do n-T grafu na obrázku 6.4. Celý interval sme rozdelili na 6 pod-intervalov v časoch približne zodpovedajúcich zmenám koncentrácie častíc slnečného vetra. Na obrázku 6.4 sú tieto intervaly oddelené jednotlivými farbami. Na n-T profile jasne vidíme 3 odlišné plazmatické režimy, pričom stupňovité zmeny koncentrácie v LLBL zodpovedajú zmenám v koncentrácii častíc slnečného vetra. Na druhej strane, aj keď jednotlivé pod-intervaly pokrývajú veľký rozsah zmien koncentrácií v slnečnom vetre, ich zmena v rámci pod-intervalu nemá viditeľný vplyv na príslušný n-T profil.

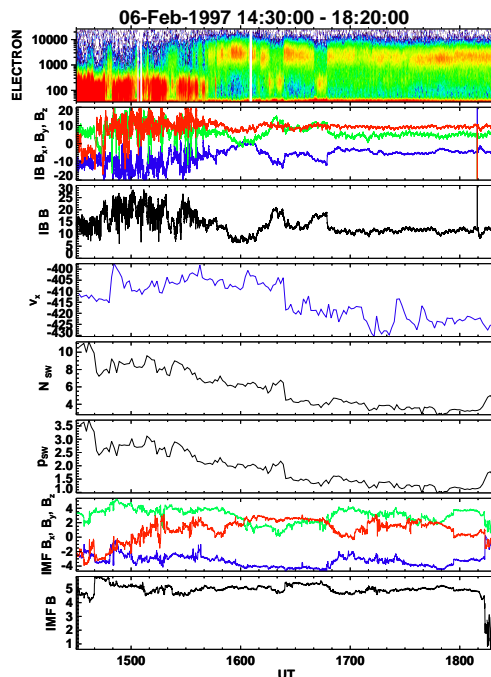


Obr. 6.3: Meranie družice Interball spolu s parametrami slnečného vetra z WINDu. Panely zhora dole: (Interball) elektrónové energetické spektrum, zložky magnetického poľa (modrá  $B_X$ , zelená  $B_Y$ , červená  $B_Z$ ), veľkosť magnetického poľa, (WIND) rýchlosť slnečného vetra, koncentrácia častíc sln. vetra, dynamický tlak častíc sln. vetra, zložky IMF, veľkosť IMF.



Obr. 6.4: Pozorovanie n-T profilu LLBL za veľmi premenlivých podmienok v slnečnom vetre. Časy jednotlivých intervalov približne zodpovedajú pozorovaným prudkým zmenám koncentrácie častíc v slnečnom vetre.

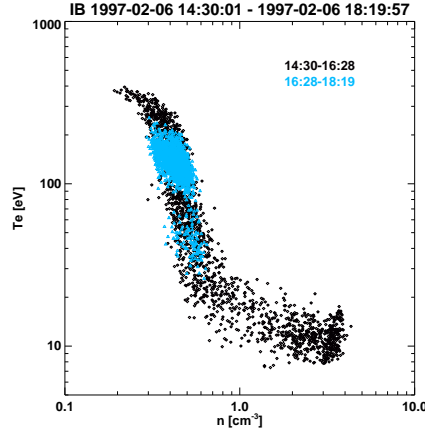
Príklad pre pozvoľne sa meniace podmienky v slnečnom vetre je na obr. 6.5. Družica Interball-1 sa 6.2.1997 v čase 14:30 UT nachádzala na súradniciach  $X_{GSE} = -6,2 R_E$ ,  $Y_{GSE} = 19,0 R_E$ ,  $Z_{GSE} = -6,2 R_E$  (večerný flank) a pohybovala sa taktiež smerom od



Obr. 6.5: Meranie družice Interball spolu s parametrami slnečného vetra z WINDu. Panely zhora dole: (Interball) elektrónové energetické spektrum, zložky magnetického poľa (modrá  $B_X$ , zelená  $B_Y$ , červená  $B_Z$ ), veľkosť magnetického poľa, (WIND) rýchlosť slnečného vetra, koncentrácia častíc sln. vetra, dynamický tlak častíc sln. vetra, zložky IMF, veľkosť IMF.

prechodovej oblasti do magnetosféry. Medziplanetárne magnetické pole bolo pomerne stabilné, koncentrácia častíc sln. vetra sa počas takmer 4 hodinového pozorovaného intervalu zmenila pozvoľne z asi  $9 \text{ cm}^{-3}$  v čase 14:30 UT na asi  $3 \text{ cm}^{-3}$  v čase 18:20 UT. Celý prechod vrstvou LLBL trval pomerne dlhú dobu, čo naznačuje veľkú šírku vrstvy, nakoľko magnetopauza sa pohybovala smerom od Zeme k Slnku (t.j. v opačnom smere ako družica) z dôvodu klesajúceho dynamického tlaku slnečného vetra.

Ako vidíme z obrázka 6.6, pozvoľné zmeny v koncentrácii slnečného vetra nemajú viditeľný vplyv na parametre elektrónov v LLBL. Výsledok tohoto porovnania je na prvý pohľad trochu protichodný. Na jednej strane LLBL nijako nereaguje na pozvoľné zmeny koncentrácie častíc v slnečnom vetre, na druhej strane pri prudkej zmene koncentrácie slnečného vetra LLBL prakticky okamžite reaguje zmenou elektrónovej a iónovej teploty. Tieto zmeny sú v zhode s Safrankova et al. (2007). V tomto článku sa v študovanej udalosti koncentrácia LLBL menila v súlade so skokovou zmenou koncentrácie v slnečnom vetre. Autori usudzujú, že došlo k priamemu plneniu prechodovej vrstvy a LLBL plazmou slnečného vetra. Naša štúdia však ukazuje, že problém je komplikovanejší, nakoľko parametre LLBL môžu zostať nezmenené aj napriek veľmi výraznej zmene parametrov slnečného vetra v prípade, že tieto zmeny prebiehajú dostatočne pomaly. Z toho usudzujeme, že flanková LLBL leží zrejme vo všeobecnosti na uzatvorených siločiarach magnetického poľa a nereaguje na zmeny pod-



Obr. 6.6: Zobrazenie n-T profilu pre udalosť z 6.2.1997. Interval je rozdelený na 2 pod-intervaly vzhľadom ku koncentrácii častíc sln. vetra označené čiernou a modrou farbou. V intervale 14:30 až 16:28 bola koncentrácia častíc v priemere asi  $7 \text{ cm}^{-3}$ , v intervale 16:28 až 18:19 asi  $4 \text{ cm}^{-3}$ .

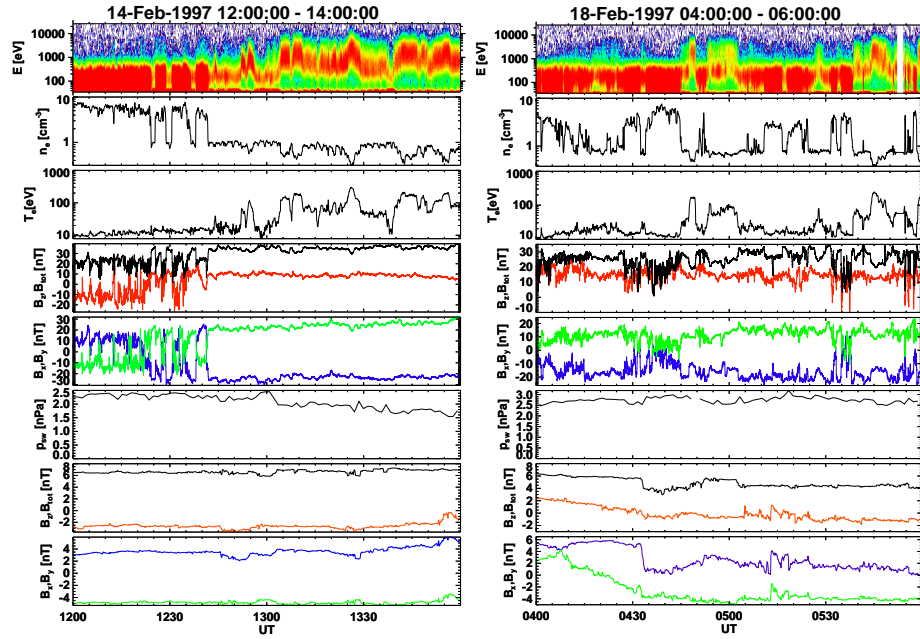
mienok v slnečnom vetre. Počas rýchlych zmien dôjde v LLBL k čiastočnému otvoreniu magnetických siločiar a nová plazma môže preniknúť dovnútra. Presný mechanizmus otvorenia siločiar je však otázný, nakoľko flanková LLBL je formovaná prepojením siločiar vo vysokých latitúdach (Nemecek et al., 2002a, 2003) a tento proces je kontrolovaný orientáciou IMF, pričom by zmeny koncentrácie mali hrať len menšiu úlohu.

### 6.3 Závislosť LLBL na IMF $B_Z$

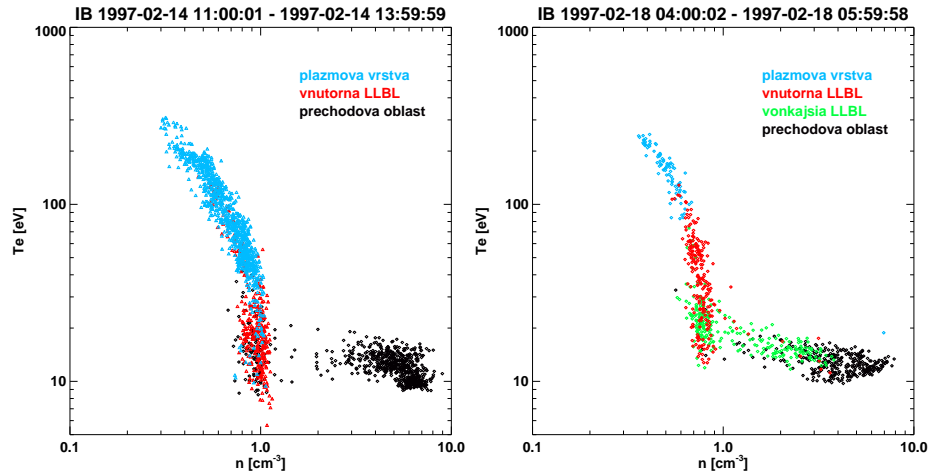
Nakoľko je všeobecne očakávané, že jedným z najdôležitejších javov podieľajúcich sa na formovaní LLBL je prepojenie siločiar magnetického poľa, pokúsili sme sa bližšie preštudovať vplyv IMF  $B_Z$ . Zvolili sme si 2 udalosti odohrávajúce sa za pomerne stálych podmienok v slnečnom vetre odlišujúce sa však v polarite IMF  $B_Z$ .

Vybrané udalosti sú z 14.2.1997 a z 18.2.1997 (viď. obrázok 6.7). V prvom prípade (ľavý panel) bolo IMF v celom intervale južné a v podstate konštantné s hodnotou  $\sim -3 \text{ nT}$ . Ostatné zložky poľa sú taktiež bez výrazných zmien. V druhom prípade (pravý panel) bolo IMF na začiatku intervalu severné s hodnotou  $\sim 2 \text{ nT}$ , postupne klesalo a pohybovalo sa okolo nuly. Na začiatku prvého prípadu mal Interball-1 súradnice  $X_{GSE} = -3,0 R_E$ ,  $Y_{GSE} = 14,9 R_E$ ,  $Z_{GSE} = -7,9 R_E$ , v druhom prípade  $X_{GSE} = -2,3 R_E$ ,  $Y_{GSE} = 17,5 R_E$ ,  $Z_{GSE} = -7,1 R_E$ . V oboch prípadoch sa teda jednalo o večerný flank, pričom sa družica pohybovala smerom z prechodovej oblasti do magnetosféry. Prípady sú tak veľmi dobre porovnateľné. Ako je vidieť z obr. 6.7, aj ostatné parametre slnečného vetra sú relatívne podobné. V rámci oboch analyzovaných udalostí došlo k niekoľkonásobnému prechodu magnetopauzy.





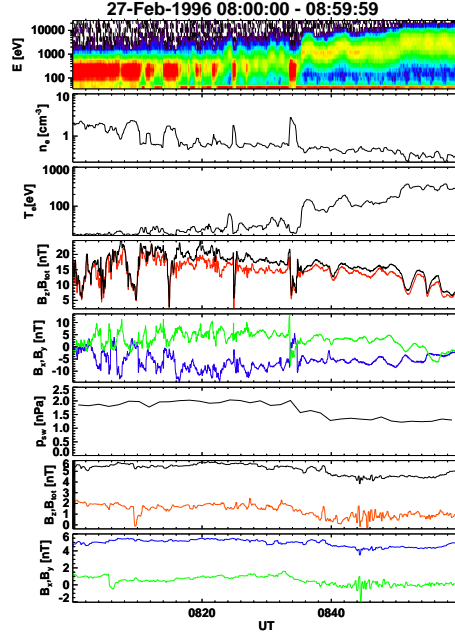
Obr. 6.7: Merania družice Interball-1 z 14.2.1997 (vľavo) a z 18.2.1997 (vpravo) s parametrami snečného vetra z WINDu. Panely zhora dole: (Interball) elektrónové energetické spektrum, koncentrácia elektrónov, teplota elektrónov, zložka  $B_Z$  (červená) a celkové magnetické pole (čierne), zložka  $B_X$  (modrá) a  $B_Y$  (zelená), (Wind) dynamický tlak sln. vetra, zložka IMF  $B_Z$  (červená) a celkové IMF (čierna), zložky IMF  $B_X$  (modrá) a IMF  $B_Y$  (zelená).



Obr. 6.8: Závislosť  $n$ - $T$  pre udalosť z 14.2.1997 pre záporné IMF  $B_Z$  a udalosť z 18.2.1997 pre kladné IMF  $B_Z$ .

Situáciu sme zakreslili do  $n$ - $T$  grafov na obr. 6.8. Z porovnania ľavého a pravého panelu vidíme, že  $n$ - $T$  profily oboch udalostí majú podobný lomený tvar. Pre južné pole je však veľmi málo bodov s koncentráciou medzi 1,2 až 2,7  $\text{cm}^{-3}$ , čo znamená, že v tejto situácii

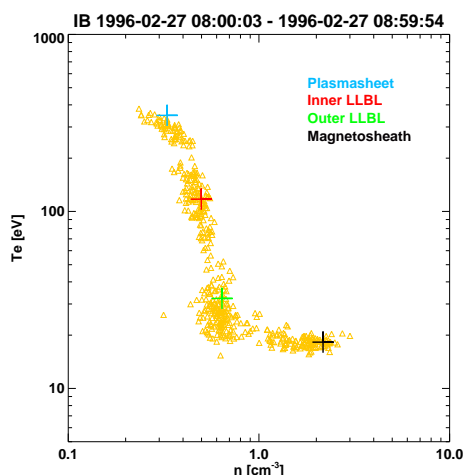
prakticky vymizne vonkajšia LLBL. Situáciu sme overili aj u iných (neuvádzame jednotlivo v práci) prechodov cez vrstvu LLBL vo flanku.



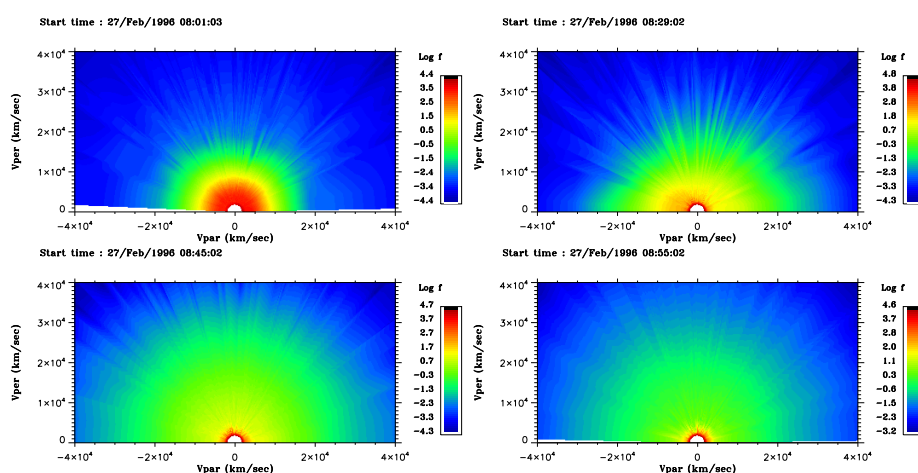
Obr. 6.9: Meranie družice Interball-1 z 27.2.1996 v čase 08:00 UT až 09:00 UT s parametrami slnečného vetra z WINDu. Panely zhora dole: (Interball) elektrónové energetické spektrum, koncentrácia elektrónov, teplota elektrónov, zložka  $B_Z$  (červená) a celkové magnetické pole (čierna), zložka  $B_X$  (modrá) a  $B_Y$  (zelená), (Wind) dynamický tlak sln. vetra, zložka IMF  $B_Z$  (červená) a celkové IMF (čierna), zložky IMF  $B_X$  (modrá) a IMF  $B_Y$  (zelená).

O tom, či LLBL leží na otvorených, alebo uzatvorených siločiarach je možné rozhodnúť na základe pozorovania jednosmerného resp. obojsmerného toku elektrónov či iónov. Situácia môže byť odlišná pre jednotlivé podvrstvy LLBL. Pre demonštráciu tohoto javu sme si vybrali príklad z 27.2.1996 (pre severné IMF obr. 6.9). Družica Interball-1 sa v čase 08:00 UT nachádzala na súradniciach  $X_{GSE} = 0,3 R_E$ ,  $Y_{GSE} = 20,2 R_E$ ,  $Z_{GSE} = -1,4 R_E$ , t.j. pribl. na terminátore vo večernej oblasti. Situácia v slnečnom vetre bola veľmi kľudná, dynamický tlak okolo 1.5 nPa, IMF  $B_X$  výrazne kladné (okolo 6 nT),  $B_Y$  v okolí 0 nT a  $B_Z$  kladné s hodnotami okolo 2 nT. Družica letela smerom z prechodovej oblasti do magnetosféry.

Situáciu sme zakreslili do n-T profilu na obr. 6.10. Zo samotného n-T profilu sme vybrali body zodpovedajúce prechodovej oblasti (čierna farba) v čase 08:01 UT, vonkajšej LLBL (zelená farba) v čase 08:29 UT, vnútornej LLBL (červená farba) v čase 08:45 UT a plazmovej vrstve (modrá farba) v čase 08:55 UT. Pre tieto jednotlivé oblasti a časy sme znázornili rozdelenie paralelnej a perpendikulárnej rýchlosti elektrónov, ktoré je možné vidieť na obr. 6.11. Zisťujeme, že rozdelenie rýchlostí je symetrické pre prechodovú oblasť, vnútornú LLBL ako aj plazmovú vrstvu, čo znamená, že plazma sa už dlhšiu dobu nachádza na uzatvorených



Obr. 6.10: Zobrazenie  $n$ - $T$  profilu pre udalosť z dňa 27.2.1996. Farebnými krížikmi sú vyznačené jednotlivé oblasti (prechodová oblasť, vonkajšia LLBL, vnútorná LLBL a plazmová vrstva), ku ktorým na obr. 6.11 prislúchajú merania rozdelenia paralelnej a perpendikulárnej rýchlosti elektrónov.



Obr. 6.11: Rozdelenie paralelnej a perpendikulárnej rýchlosti elektrónov pozorovaných družicou Interball-1 počas udalosti z 27.2.1996. Ľavý horný panel zodpovedá prechodovej oblasti v čase 08:01 UT, pravý horný panel vonkajšej LLBL v čase 08:29 UT, ľavý dolný panel vnútornej LLBL v čase 08:45 UT a pravý dolný panel je meraním z plazmovej vrstvy v čase 8:55 UT.

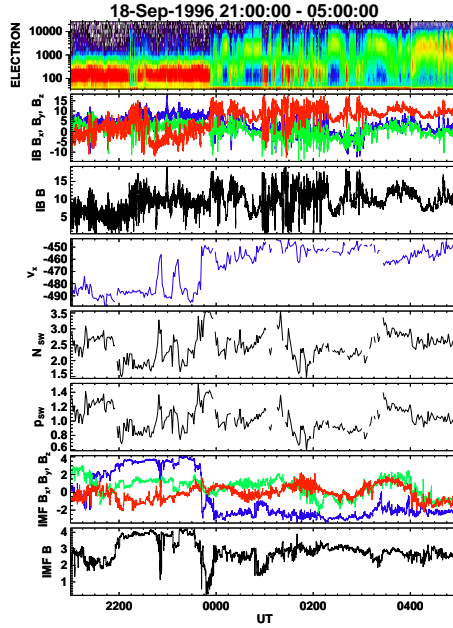
siločiara a pôsobením fluktuácií došlo k termalizácii distribučnej funkcie. Odlišná situácia je na pravom hornom panele obr. 6.11, ktorý zodpovedá vonkajšej vrstve LLBL. Pozorujeme tu určitú nesymetriu v toku elektrónov, čo znamená prítomnosť jednosmerného toku a tým existenciu otvorených siločiar magnetického poľa. Skutočnosť, že nájsť taký prípad, ako je znázornený na obrázku 6.11 je pomerne obtiažné, viedla vyššie citovaných autorov (napr.

Le et al. (1996)) k predpokladu, že vonkajšia LLBL sa nachádza na kombinácii otvorených a uzatvorených siločiar. Geometriu, kde sa v priestore striedajú oblasti otvorených a uzatvorených siločiar je však obtiažné si predstaviť, preto sa naproti tomu domnievame, že celá vonkajšia LLBL leží na otvorených siločiarach, no je veľmi tenká. Dáta pre jeden panel na obr. 6.11 sú zbierané po dobu dvoch minút. Celá LLBL je v neustálom pohybe a pokiaľ je vonkajšia LLBL tenká, tak pravdepodobnosť, že v nej družica strávi minimálne 2 minúty je veľmi malá. Potvrdenie tejto hypotézy je možné nájsť aj na obr. 6.8. Vonkajšia LLBL pre južné pole chýba, pretože táto vrstva sa na flanke nevytvára a je pozorovaná len vnútorná LLBL, ktorá sa vytvorila v priebehu predchádzajúceho intervalu so severným IMF a zostala konzervovaná na uzatvorených siločiarach.

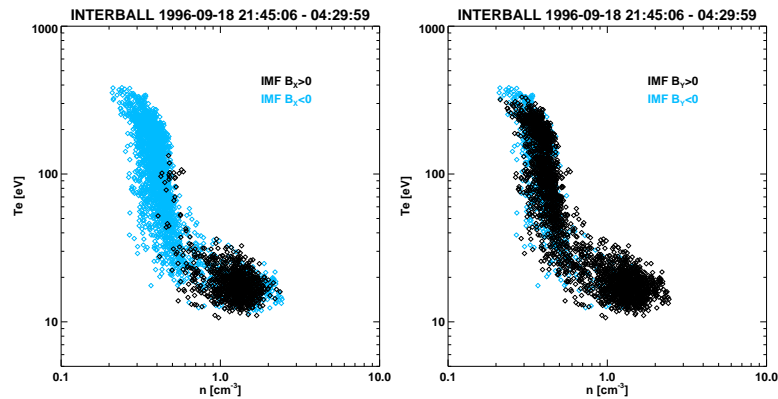
#### 6.4 Závislosť LLBL na IMF $B_X$ a IMF $B_Y$ , vplyv fluktuácií v slnečnom vetre

Zmeny v orientácii IMF, študované v práci Dusik et al. (2007)(príloha C4), znamenajú zmenu podmienok pre lokálny prienik plazmy do LLBL z príľahlej prechodovej vrstvy. Príklad prudkej zmeny v x-ovej komponente IMF je na obrázku 6.12. Družica Interball-1 sa 18.9.1996 v čase 21:00 UT nachádzala na súradniciach  $X_{GSE} = -8,9 R_E$ ,  $Y_{GSE} = -22,7 R_E$ ,  $Z_{GSE} = -1,5 R_E$  (ranný flank) a smerovala z prechodovej oblasti do magnetosféry. Podmienky v slnečnom vetre boli pomerne fluktuujúce, družica počas sledovaného intervalu niekoľko krát prešla magnetopauzou (ktorá sa vďaka zmenám podmienok pohybovala v okolí dráhy družice). Dôležitá udalosť nastala v čase  $\sim 23:43$  UT, keď došlo k náhlemu otočeniu x-ovej zložky IMF z hodnoty  $+2$  nT na  $-2$  nT.

Z prostého pohľadu na obrázok 6.13 vidíme, že okamžiky, kde majú zložky  $B_X$  alebo  $B_Y$  kladnú resp. zápornú orientáciu nevytvárajú v diagrame žiadne výrazné oblasti. Preto môžeme konštatovať, že tieto zložky majú na vlastný profil LLBL len malý vplyv. Oproti tomu porovnaním obrázkov 6.8 a 6.13 si môžeme povšimnúť, že oblasť vonkajšej LLBL je na obrázku 6.13 veľmi "úzka", koncentrácia sa mení len asi dvojnásobne. To znamená, že koncentrácia vo vnútornej vrstve je značne vysoká. Na rozdiel od vzájomnej väzby prechodovej oblasti a LLBL, ktorá je sprostredkovaná prepojovaním magnetických siločiar, je jediným procesom, ktorý prenáša plazmu vo vnútri LLBL difúzia. Domnievame sa, že relatívne vysokú koncentráciu vo vnútornej časti LLBL môžeme pripočítať vplyvu fluktuácií (viď obr. 6.12), ktoré vedú k intenzívnej difúzii cez rozhranie medzi vonkajšou a vnútornou časťou LLBL.



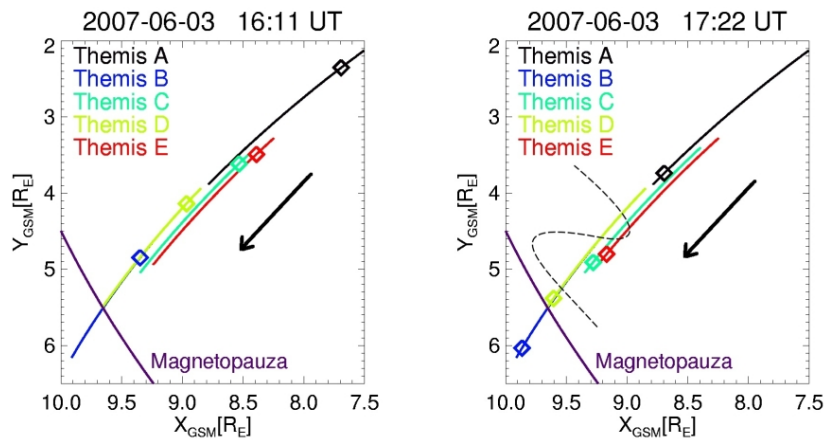
Obr. 6.12: Meranie družice Interball spolu s parametrami slnečného vetra z WINDu. Panely zhora dole: (Interball) elektrónové energetické spektrum, zložky magnetického poľa (modrá  $B_X$ , zelená  $B_Y$ , červená  $B_Z$ ), veľkosť magnetického poľa, (WIND) rýchlosť slnečného vetra, koncentrácia častíc sln. vetra, dynamický tlak častíc sln. vetra, zložky IMF, veľkosť IMF.



Obr. 6.13: Analýza možného vplyvu IMF  $B_X$  (vľavo) a IMF  $B_Y$  (vpravo) na parametre LLBL. Farebne sú odlišené polarity IMF  $B_X$  a IMF  $B_Y$ .

## 6.5 Priestorový profil LLBL, použitie viacbodových meraní

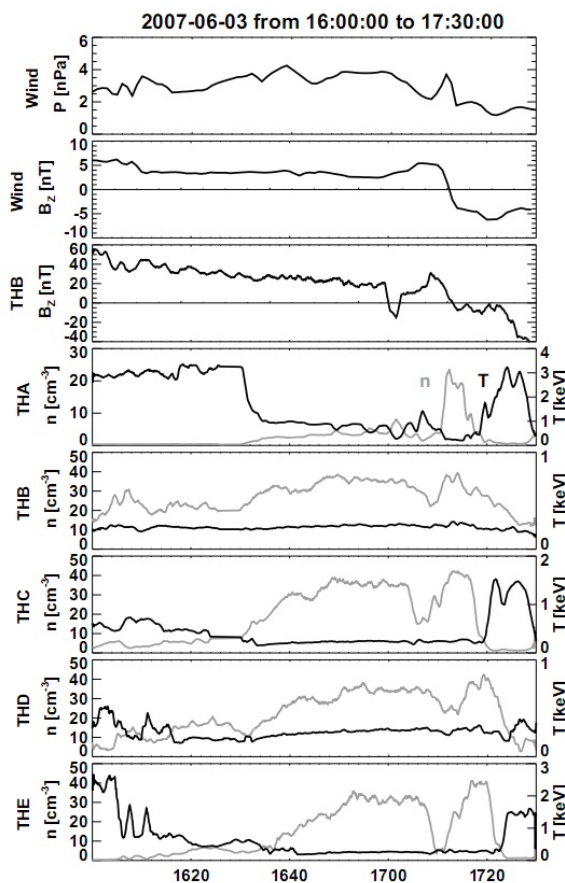
Merania jednotlivých družíc nie sú schopné rozlíšiť priestorové a časové zmeny vzhľadom k rýchlemu pohybu magnetopauzy a LLBL. Na výskum dynamiky týchto štruktúr je potrebné použiť súčasné merania minimálne dvoch, no optimálne viacerých družíc. Z toho dôvodu napr. Sibeck et al. (2000) analyzovali merania páru družíc Interball-1 a Magion 4 vo vrstve LLBL a došli k záveru, že vnútorná družica (bližšie k Zemi) pozoruje skoro vždy redšiu plazmu, ako vonkajšia družica. Našli však prípady, kde to tak nebolo, pričom tieto udalosti boli vždy spojené s rýchlou zmenou polohy magnetopauzy, ktoré boli doprevádzané s rozrušením jej povrchu. Skonštatovali, že znižovanie koncentrácie plazmy v LLBL je rovnomerné a pozorované fluktuácie sú dôsledkom vlnení profilu LLBL v okolí družíc. Ich merania pochádzali z oblasti flanku a boli limitované prístrojovým vybavením projektu Interball.



Obr. 6.14: Projekcia dráh družíc Themis do roviny  $XY_{GSM}$ . Farebné krivky reprezentujú dráhy jednotlivých družíc. Vyznačené kosoštvorce na krivkách sú polohy družíc v čase 16:11 UT (ľavý panel) a v čase 17:22 UT (pravý panel). Tmavofialová krivka v ľavej dolnej časti panelov reprezentuje modelovú magnetopauzu (model Shue et al. (1997)), čiarkovaná čierna krivka na pravom panele schematicky znázorňuje očakávanú deformáciu magnetopauzy v čase 17:22 UT.

Projekt Themis, ktorý pozostáva z piatich družíc v počiatočných fázach misie letiacich po takmer rovnakých orbitách za sebou vo vzájomnej vzdialenosti zhruba  $1 R_E$ , ktoré preliehtali dva krát denne magnetopauzou v prislnečnej oblasti poskytoval jedinečnú príležitosť pre štúdium štruktúry LLBL. Ako príklad sme si vybrali udalosť z dňa 3.6.2007, študovanú v prácach Oieroset et al. (2008) a Li et al. (2009). Autori poukázali na skutočnosť, že LLBL bola naraz pozorovaná 4 družicami, no nevenovali pozornosť profilu vrstvy LLBL, ktorý sme zanalyzovali v práci Tkachenko et al. (2010)(príloha C5). Poloha družíc v časoch 16:11 UT je znázornená na ľavom panele obr. 6.14. Družice sa pohybovali smerom od Zeme. Najväčšia vzdialenosť bola medzi družicami THA a THB ( $\sim 2,3 R_E$ ), ostatné družice sa nachádzali

medzi týmito dvoma, pričom THC a THE boli v tesnej blízkosti (tento fakt bude hrať dôležitú úlohu v interpretácii tejto udalosti). Situácia v čase 17:22 UT je znázornená na paneli vpravo.

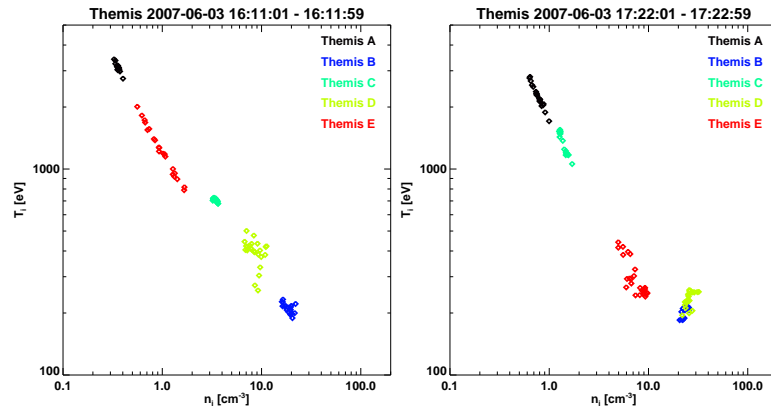


Obr. 6.15: Prehľad meraní družíc Themis a slnečného monitora Wind. Panely zhora dole: dynamický tlak slnečného vetra;  $B_Z$  komponenta IMF (z Windu);  $B_Z$  komponenta poľa v prechodovej oblasti (z THB); koncentrácia a teplota elektrónov z THA až THE.

Merania parametrov slnečného vetra (družica Wind) ako aj merania dôležitých parametrov pre určenie polohy magnetopauzy družicami Themis je na obr. 6.15. Z meraní sa dá očakávať stabilná poloha magnetopauzy zhruba do času 17:10 UT, kde došlo k poklesu dynamického tlaku a otočeniu polarity IMF. Tieto dve udalosti prebehli skoro súčasne, no ich efekt je navzájom opačný - zníženie  $p_{sw}$  znamená posun magnetopauzy smerom k Slnku, južné IMF posúva magnetopauzu smerom k Zemi. Pre zvýšenie spoľahlivosti určenia IMF znázorňujeme na treťom paneli obr. 6.15 merania magnetického poľa družicou THB, ktorá slúži v tejto chvíli ako monitor v prechodovej oblasti. Zvyšných 5 panelov ukazuje koncentráciu a teplotu iónov meraní družicami THA až THE.

Vidíme, že najvzdialenejšia družica THB sa nachádzala celý čas v prechodovej oblasti (pozorovala studené ( $\sim 150$  eV), husté ( $20 - 40 \text{ cm}^{-3}$ ) ióny). Zo začiatku intervalu sa družice

THC, THD a THE nachádzali v rôznych oblastiach LLBL až do času  $\sim 16:35$  UT, keď zvýšený dynamický tlak posunul magnetopauzu bližšie k Zemi a táto prekrížila dráhu družíc (THD v čase 16:37 UT, THC v 16:38 UT a THE v 16:41 UT). Družice sa tým dostali do prechodovej oblasti. Družica THA zostala v magnetosfére, no pozorovala hustejšie a chladnejšie ióny. Zmeny v orientácii IMF a dynamickom tlaku v čase okolo 17:10 UT spôsobili osciláciu magnetopauzy. Najprv družice THC, THD a THE opäť preleteli magnetopauzou (v čase  $\sim 17:10$  UT), potom sa znova objavili v prechodovej oblasti (v čase  $\sim 17:12$ ) až nakoniec od  $\sim 17:20$  UT znova sledovali vrstvu LLBL. Čo sa týka družice THA, tá do času  $\sim 17:11$  UT zostávala v LLBL, potom preletela magnetopauzou a zaznamenala vrstvu PDL a po zhruba dvoch minútach vstúpila do plazmovej vrstvy.



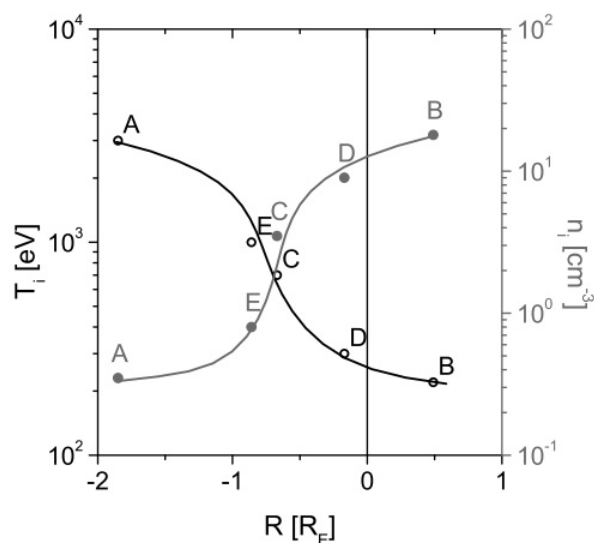
Obr. 6.16: Koncentrácia iónov vs. teplota iónov meraná družicami Themis A až Themis E dňa 3.6.2007. Ľavý panel predstavuje interval za kľudných podmienok v slnečnom vetre, pravý interval zase za narušených podmienok.

V ľavej časti obrázku 6.16 je zobrazenie  $n$ - $T$  závislosti pre iónové dáta merané družicami THA až THE v intervale od 16:11 do 16:12 UT. Z obrázku je patrné, že dáta sú zoradené skoro lineárne. Ak tento obrázok dáme do súvislosti s polohami družíc na obrázku 6.14, vidíme, že teplota rovnomerne klesá a koncentrácia rovnomerne rastie od horúcich riedkych iónov plazmovej vrstvy až po chladné riedke ióny prechodovej oblasti.  $N$ - $T$  profily vykazujú podobný charakter ako na obr. 6.16 až do času  $\sim 16:35$  UT. Po tomto čase sa magnetopauza presunula bližšie k Zemi. Družice mapovali profil LLBL až do času  $\sim 16:41$  UT, keď sa až na THA už nachádzali všetky v prechodovej oblasti, pričom stále si zachovávali pôvodné zoradenie na  $n$ - $T$  grafe. Kombináciou polôh družíc s ich meraním teplôt a koncentrácií iónov dostávame priestorový profil znázornený na obr. 6.17.

Horizontálna osa obr. 6.17 zachytáva predpokladanú polohu magnetopauzy vzhľadom k referenčnému bodu vypočítanému podľa modelu Shue et al. (1997). Údaje na obr. 6.17 sú priemery v intervale 16:07 až 16:27 UT, keď vrstvu LLBL sledovali 3 z družíc.

Ako vidíme z tretieho panelu obr. 6.15, magnetické pole v prechodovej vrstve v čase  $\sim 17:00$  UT na chvíľu zmenilo orientáciu na južné. Táto zmena odštartovala sekvenciu pre-





Obr. 6.17: Predpokladané priestorové profily koncentrácie iónov LLBL a ich teplôt načrtnuté na základe meraní družíc Themis v časovom intervale 16:07 UT až 16:27 UT.

chodov magnetopauzy pozorovaných všetkými družicami s výnimkou THB, ktorá zostávala v prechodovej oblasti a pozorovala prepád koncentrácie z  $\approx 35 \text{ cm}^{-3}$  na  $\approx 25 \text{ cm}^{-3}$ . Nakoľko celá oblasť bola v pohybe, je ťažké určiť, či je tento pokles spôsobený poklesom koncentrácie v prechodovej oblasti, alebo je to spôsobené prítomnosťou vrstvy PDL. Aj napriek takto rozrušeným podmienkam, n-T plot vo väčšine prípadov vykazuje rovnaké správanie, ako v ľavom panele obr. 6.16. Je však možné nájsť ojedinelé krátke intervaly, kde je poradie družíc zmenené, ako ukazuje pravý panel obr. 6.16. V tomto prípade je družica THA v plazmovej vrstve, THB a THD sa pohybujú v prechodovej oblasti ale THE je ďalej od nominálnej magnetopauzy ako THC (obr. 6.14) pozorujúc chladnejšiu a hustejšiu plazmu. Takáto situácia sa pozorovala len v súvislosti s narušením magnetopauzy. Predpokladáme, že monotónny priestorový profil parametrov vo vnútri LLBL je zachovaný aj za týchto narušených podmienok a skutočnosť, že THE meria hustejšiu plazmu ako THC je zapríčinené zmenou vzdialenosti družíc od magnetopauzy v dôsledku rozrušenia jej povrchu. V prípade, že by lokálny tvar magnetopauzy zodpovedal čiarkovanej krivke v pravej časti obrázku 6.14 (tento predpokladaný tvar je v súlade s pozorovanou sekvenciou prechodov magnetopauzy), družica THE sa na chvíľku ocitne bližšie k magnetopauze, ako družica THC.



# Kapitola 7

## Záver

V dizertačnej práci sme študovali tvar a polohu magnetopauzy a profil prilahlej hraničnej vrstvy v nízkych šírkach. Pre riešenie sme použili dva prístupy k problematike:

- štatistické spracovanie skoro 10 tisíc prechodov magnetopauzy z družíc Interball-1, Magion 4, Geotail a Themis
- štúdium štruktúry LLBL na základe pozorovaní.

Ak zhrnieme výsledky, môžeme povedať, že

1. Zo štatistického porovnania Safrankova et al. (2002); Dusik et al. (2003); Safrankova et al. (2005)(prílohy **C1, C2, C3**) najčastejšie používaných modelov magnetopauzy vyplýva, že najpresnejšie predpovede tvaru a polohy magnetopauzy poskytuje model Petrinec and Russell (1996) a to vo vysokých aj nízkych geomagnetických šírkach. Vo vysokých geomagnetických šírkach je možné model Petrinec and Russell (1996) ďalej spresniť a to započítaním závislosti na tilt uhle, ktorú sme v rámci (Safrankova et al., 2005)(príloha **C3**) navrhli. Tieto výsledky sa stretli so záujmom vedeckej komunity, čo je možné demonštrovať na príklade článku Lin et al. (2010), kde sa autori pokúsili pripraviť 3D asymetrický model polohy magnetopauzy. Po overení modelu konštatujú, že ich model potvrdzuje naše závery:
  - a) denná strana magnetopauzy je deformovaná v oblasti kaspu
  - b) priemerná šírka tohto vhlbenia je  $\sim 2,5 R_E$ , ale často je pozorovaná až o  $4 R_E$  hlbšie (pri použití modelu Petrinec and Russell (1996))
  - c) rozmer deformácie nie je závislý na tilt uhle, ale poloha magnetopauzy sa s tilt uhlom mení
  - d) deformácia je pozorovaná až do vzdialenosti  $X_{GSE} \sim 8 R_E$  v geomagnetických šírkach väčších ako  $30^\circ$ .
2. Z porovnania dvoch setov dát (z rokov 1995–1998 (družice Interball-1, Magion 4 a Geotail) a z rokov 2007–2008 (družice Themis)) prechodov družíc magnetopauzou v závislosti na dynamickom tlaku slnečného vetra je možné skonštatovať, že závislosť na 6. odmocnine nie je presná v oblasti nižších tlakov (obr. 5.2 vs obr. 5.15). Pre datový

set z rokov 1995–1998 je táto závislosť síce menej výrazná, ale domnievame sa, že to je dané tým, že dáta v tomto sete sú pre subsolárnu oblasť prevažne z družice Geotail, ktorej dráhové parametre boli v niektorých obdobiach blízke polohe magnetopauzy, čo pozorovania čiastočne skreslilo. Odchýlka od modelu Petrinec and Russell (1996) pre nízke tlaky dosahuje v priemere  $1 R_E$  (viď obrázok 5.17).

3. Štatistické spracovanie súboru prechodov magnetopauzou družíc Themis z rokov 2007–2008 (Dusik et al., 2010)(príloha **C6**) prinieslo nezvratný dôkaz o vplyve tzv. "cone" uhla (uhol medzi vektorom IMF a vektorom rýchlosti slnečného vetra) na polohu magnetopauzy v subsolárnej oblasti. Tento vplyv je zmieňovaný v prípadových štúdiách napr. Merka et al. (2003) a Jelinek et al. (2010). Táto závislosť je výraznejšia opäť v obore nízkych tlakov a tak k tomuto dôkazu prispelo dlhé obdobie slnečného minima. Domnievame sa, že tento efekt je možné pripočítať menej efektívnej transformácii energie slnečného vetra spojenej s jeho unášavým pohybom do energie tepelnej.
4. Z prípadových štúdií štruktúry LLBL je možné vyzdvihnúť dva významné výsledky:
  - a) Štruktúra vrstvy LLBL silne závisí na orientácii IMF. Tento výsledok bol síce očakávaný, ale nám sa analýzou n-T plotov podarilo preukázať, že pri južnej orientácii IMF vymizne vonkajšia vrstva LLBL, ktorá podľa našich výsledkov leží na otvorených magnetických siločiarach. V takýchto intervaloch je plazma slnečného vetra prenesená do magnetopauzy v oblasti kaspov. V prípade severného IMF je naopak táto vrstva vytváraná prepojením magnetických siločiar a plazma do magnetosféry preniká hlavne difúziou, ktorá môže byť podstatne zintenzívnená fluktuáciami v slnečnom vetre.
  - b) Z viacbodových meraní družíc projektu Themis sme na príklade udalosti z 3.6.2007 v práci Tkachenko et al. (2010)(príloha **C5**) demonštrovali, že počas kľudných podmienok v slnečnom vetre a severnej orientácii IMF vykazuje vrstva LLBL hladkú a monotónnu zmenu koncentrácie a teploty iónov na vzdialenosti  $\approx 1 R_E$ . Náhle zmeny parametrov slnečného vetra (resp. zmeny parametrov v prechodovej oblasti) môžu viesť k nemonotónnym profilom parametrov plazmy, no z nášho pozorovania vyplýva, že tento jav s najväčšou pravdepodobnosťou súvisí s rozrušením povrchu magnetopauzy.

# Literatúra

- Alexeev, I., Kalgaev, V., Lyutov, Y., 1999. The parabolic magnetopause form and location versus solar wind pressure and IMF. 9<sup>th</sup> Scientific Assembly of IAGA, Birmingham July 19-24, A343.
- Aubry, M., Kivelson, M., Russell, C., 1971. Motion and structure of the magnetopause. J. Geomagn. Geoelectr. 76, 1673.
- Auster, H., Glassmeier, K., Magnes, W., Aydogar, O., Baumjohann, W., Constantinescu, D., Fischer, D., Fornacon, K., Georgescu, E., Harvey, P., Hillenmaier, O., Kroth, R., Ludlam, M., Narita, Y., Nakamura, R., Okrafka, K., Plasche, F., Richter, I., Schwarzl, H., Stoll, B., Valavanoglou, A., Wiedemann, M., 2008. The THEMIS Fluxgate Magnetometer. Space Sci. Rev. 141, 235.
- Bauer, T., Treumann, R., Baumjohann, W., 2001. Investigation of the outer and inner low-latitude boundary layers. Ann. Geophys. 19, 1065–1088.
- Baumjohann, W., Paschmann, G., Cattell, C., 1989. Average plasma properties in the central plasma sheet. J. Geophys. Res. 94, 6597.
- Bogdanova, Y., Owen, C., Dunlop, M., Wild, J., Davies, J., Lahiff, A., Taylor, M., Fazakerley, A., Dandouras, I., Carr, C., Lucek, E., Reme, H., 2008. Formation of the low-latitude boundary layer and cusp under northward IMF: Simultaneous observations by Cluster and Double Star. J. Geophys. Res. 113, A07S07.
- Dusík, S., 2002. Formovanie magnetosférických hraníc: magnetopauza. Diplomová práca MFF UK Praha.
- Dusík, S., Granko, G., Safrankova, J., Nemecek, Z., Jelinek, K., 2010. IMF cone angle control of the magnetopause location: Statistical study. Geophys. Res. Lett., Odoslané do tlače.
- Dusík, S., Safrankova, J., Nemecek, Z., 2003. A statistical study of low-latitude magnetopause crossings. WDS'03 Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media. Matfyzpress, Prague, 254–260.

- Dusik, S., Safrankova, J., Nemecek, Z., 2007. A Study of the LLBL Profile Using n-T Plots. WDS'07 Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media. Matfyzpress, Prague, 42–49.
- Dusik, S., Safrankova, J., Nemecek, Z., Prech, L., 2005. Low-Latitude Boundary Layer Under Different IMF Orientations. WDS'05 Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media. Matfyzpress, Prague, 42–49.
- Eastman, T., Boardsen, S., Chen, S.-H., Fung, S., Kessel, R., 2000. Configuration of high-latitude and high-altitude boundary layers. *J. Geophys. Res.* 105, 23221–23238.
- Eastman, T., Frank, L., Peterson, W., Lennartsson, W., 1984. The plasma sheet boundary layer. *J. Geophys. Res.* 89, 1553–1572.
- Eastman, T., Hones, E., Bame, S., Asbridge, J., 1976. The magnetospheric boundary layer: Site of plasma, momentum and energy transfer from the magnetosheath into the magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.* 3, 685–688.
- Eastman, T., Hones, E. J., 1979. Characteristics of the magnetospheric boundary layer and magnetopause layer as observed by IMP 6. *J. Geophys. Res.* 84, 2019–2028.
- Encrenaz, T., Bibring, J.-P., Blanc, M., Barucci, M.-A., Roques, F., Zarka, P., 2003. *The Solar System*. Springer book ISBN 3-540-00241-3.
- Fairfield, D., 1971. Average and unusual locations of the Earth's magnetopause and bow shock. *J. Geophys. Res.* 76, 6700.
- Fear, R., Fazakerley, A., Owen, C., Lahiff, A., Lucek, E., Balogh, A., Kistler, L., Mouikis, C., Reme, H., 2005. Cluster observations of boundary layer structure and flux transfer event near cusp. *Ann. Geophys.* 23, 2605–2620.
- Fitzenreiter, R., Ogilvie, K., 1995. Kelvin-Helmholtz instability at the magnetopause: Observations, in: *Physics of the Magnetopause*, ed. by P. Song et al. 90, 277–284.
- Formisano, V., 1979. Orientation and shape of the Earth's bow shock in three dimensions. *Planet Space Sci.* 27, 1151–1161.
- Formisano, V., Domingo, V., Wenzel, K.-P., 1979. The three-dimensional shape of the magnetopause. *Planet Space Sci.* 27, 1137–1149.
- Foullon, C., Farrugia, C., Fazakerley, A., Owen, C., Gratton, F., Torbert, R., 2008. Evolution of Kelvin-Helmoltz activity on the dusk flank magnetopause. *J. Geophys. Res.* 113, A11203.
- Fujimoto, M., Terasawa, T., 1994. Anomalous ion mixing within an MHD scale Kelvin-Helmholtz vortex. *J. Geophys. Res.* 99, 8601–8613.

- Fuselier, S., Anderson, B., Onsager, T., 1995. Particle signatures of magnetic topology at the magnetopause AMPTE/CCE observations. *J. Geophys. Res.* 100, 11805.
- Gosling, J., Thomsen, M., Bame, S., Russell, C., 1986. Accelerated plasma flows at the near tail magnetopause. *J. Geophys. Res.* 91 (3029).
- Haerendel, G., Paschman, G., Scopke, N., Rosenbauer, H., 1978. The frontside boundary layer of the magnetosphere and the problem of reconnection. *J. Geophys. Res.* 83 (A7), 3195–3216.
- Hall, D., Bryant, D., Chaloner, C., 1985. Plasma variations at the dayside magnetopause. in *Proc. 7th ESA Symp. on Rockets and Balloons* ESA SP, 229,299.
- Hall, D., Chaloner, C., Briant, D., Lepine, D., Tritakis, V., 1991. Electrons in the boundary layers near the dayside magnetopause. *J. Geophys. Res.* 96, 7869–7891.
- Hapgood, M., Bryant, D., 1990. Re-ordered electron data in the low-latitude boundary layer. *Geophys. Res. Lett.* 17, 2043–2046.
- Hapgood, M., Bryant, D., 1992. Exploring the magnetospheric boundary layer. *Planet Space Sci.* 40, 1431–1459.
- Hasegawa, H., Fujimoto, M., Takagi, K., Saito, Y., Mukai, T., Reme, H., 2006. Single spacecraft detection of rolled-up Kelvin-Helmholtz vortices at the flank magnetopause. *J. Geophys. Res.* 111, A09203.
- Holzer, R., Slavin, J., 1978. Magnetic flux transfer associated with expansions and contractions of the dayside magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 83, 3831.
- Jelinek, K., Nemecek, Z., Safrankova, J., Shue, J.-H., Suvorova, A., Sibeck, D., 2010. Thin magnetosheath as a consequence of the magnetopause deformation: THEMIS observations. *J. Geophys. Res.* In Press.
- Jerab, M., Nemecek, Z., Safrankova, J., Jelinek, K., Merka, J., 2005. Improved bow shock model with dependence on the IMF strength. *Planet Space Sci.* 53 (1-3), 85–93.
- Kawano, H., Petrinec, S., Russell, C., Higuchi, T., 1999. Magnetopause shape determinations from measured position and estimated flaring angle. *J. Geophys. Res.* 104, 247.
- Klimov, S., Romanov, S., Amata, E., 1997. ASPI experiment: measurements of fields and waves on board the INTERBALL-1 spacecraft. *Ann. Geophys.* 15, 514–527.
- Kokubun, S., Yamamoto, T., Acuna, M., Hayashi, K., Shiokawa, K., Kawano, H., 1994. The Geotail Magnetic Field Experiment. *J. Geomagn. Geoelectr.* 46, 7–21.
- Kuznetsov, S., Suvorova, A., 1996. Empirical model of the dayside magnetopause. INP MSU Preprint 96-37/444 Moskva.

- Lavraud, B., Thomsen, M., Taylor, M., Wang, Y., Phan, T., Schwartz, S., Elphic, R., Fazakerley, A., Reme, H., Balogh, A., 2005. Characteristics of the magnetosheath electron boundary layer under northward interplanetary magnetic field: Implications for high/latitude reconnection. *J. Geophys. Res.* 110, A06209.
- Le, G., Russell, C., Gosling, J., Thomsen, M., 1996. ISEE observations of low-latitude boundary layer for northward interplanetary magnetic field: Implications for cusp reconnection. *J. Geophys. Res.* 101, 27239–27249.
- Lemaire, J., Roth, M., 1978. Penetration of solar wind plasma elements into the magnetosphere. *J. Atm. Terr. Phys.* 40, 331.
- Lepping, R., Acuna, M., Burlaga, L., Farrell, W., Slavin, J., Schatten, K., Mariani, F., Ness, N., Neubauer, F., Whang, Y., Byrnes, J., Kennon, R., Panetta, P., Scheifele, J., Worley, E., 1995. The Wind Magnetic Field Investigation. *Space Sci. Rev.* 71, 207–229.
- Li, W., Raeder, J., Oieroset, M., Phan, T., 2009. Cold dense magnetopause boundary layer under northward IMF: Results from THEMIS and MHD simulations. *J. Geophys. Res.* 114, A00C15.
- Lin, R., Zhang, X., Liu, S., Wang, Y., Gong, J., 2010. A three-dimensional asymmetric magnetopause model. *J. Geophys. Res.* 115, A04207.
- Lundin, R., Sauvaud, J.-A., Reme, H., Balogh, A., Dandouras, I., Bosqued, J., Carlson, C., Parks, G., Mobius, E., Kistler, L., Klecker, B., Amata, E., Formisano, V., Dunlop, M., Eliasson, L., Korth, A., Lavraud, B., McCarthy, M., 2003. Evidence for impulsive solar wind plasma penetration through the dayside magnetopause. *Ann. Geophys.* 21 (2), 457–472.
- Lutsenko, V., Kudela, L., Sarris, E., 1998. The DOK-2 experiment to study energetic particles by the Tail probe and Auroral Probe Satellites in the INTERBALL project. *Cosmic Res.* 36, 93–102.
- Matsumoto, Y., Hoshino, M., 2004. Onset of turbulence induced by a Kelvin-Helmholtz vortex. *Geophys. Res. Lett.* 31, L02807.
- Matsumoto, Y., Hoshino, M., 2006. Turbulent mixing and transport of collisionless plasmas across a stratified velocity shear layer. *J. Geophys. Res.* 111, A05213.
- McComas, D., Blame, S., Barker, P., Feldman, W., Phillips, J., Riley, P., Griffee, J., 1998. Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor (SWEPAM) for the Advanced Composition Explorer. *Space Sci. Rev.* 86, 563–612.
- McFadden, J., Carlson, C., Larson, D., Ludlam, M., Abiad, R., Elliott, B., Turin, P., Marckwordt, M., Angelopoulos, V., 2008. The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration. *Space Sci. Rev.* 141, 277.



- Merka, J., 2000. Kaspové plazma ve vysokých výškách. Dizertační práce MFF UK Praha.
- Merka, J., Szabo, A., Safrankova, J., Nemecek, Z., 2003. Earth's bow shock and magnetopause in the case of a field-aligned upstream flow: Observation and model comparison. *J. Geophys. Res.-Space Phys.* 108 (A7).
- Mitchell, D., Kutchko, F., Williams, D., Eastman, T., Frank, L., Russell, C., 1987. An extended study of the low-latitude boundary layer on the dawn and dusk flanks of the magnetopause. *J. Geophys. Res.* 92, 7394–7404.
- Mukai, T., Machida, S., Saito, Y., Hirahara, M., Terasawa, T., Kaya, N., Obara, T., Ejiri, M., 1994. The low energy particle (LEP) experiment onboard the Geotail satellite. *J. Geomagn. Geoelectr.* 46, 669–6952.
- Nakamura, T., Fujimoto, M., 2005. Magnetic reconnection within rolled-up MHD-scale Kelvin-Helmholtz vortices: Two-fluid simulations including finite electron inertial effects. *Geophys. Res. Lett.* 32, L21102.
- Nakamura, T., Fujimoto, M., Otto, A., 2006. Magnetic reconnection induced by weak Kelvin-Helmholtz instability and the formation of the low-latitude boundary layer. *Geophys. Res. Lett.* 33, L14106.
- Nakamura, T., Hayashi, D., Fujimoto, M., 2004. Decay of MHD-scale Kelvin-Helmholtz vortex mediated by parasitic electron dynamics. *Phys. Rev. Lett.* 92, 145001.
- Nemecek, Z., Fedorov, A., Safrankova, J., Zastenker, G., 1997. Structure of the low-latitude magnetopause: MAGION-4 observations. *Ann. Geophys.* 15, 553–561.
- Nemecek, Z., Safrankova, J., 1991. The Earth's bow shock and magnetopause position as a result of the solar wind-magnetosphere interaction. *J. Atmos. Terr. Phys.* 53 (11-12), 1049–1054.
- Nemecek, Z., Safrankova, J., Prech, L., Sauvaud, J.-A., 2002a. The structure of magnetopause layers at low latitudes: INTERBALL contributions to the topic. *Geophysical Monograph Series, AGU* 133, 71–82.
- Nemecek, Z., Safrankova, J., Prech, L., Simunek, J., Sauvaud, J.-A., Fedorov, A., Stenuit, H., Fuselier, S., Savin, S., Zelenyi, L., Berchem, J., 2003. Structure of the outer cusp and sources of the cusp precipitation during intervals of a horizontal IMF. *J. Geophys. Res.* 108 (A12), 1420.
- Nemecek, Z., Safrankova, J., Zastenker, G., Pisoft, P., Jelinek, K., 2002b. Low-frequency variations of the ion flux in the magnetosheath. *Planet Space Sci.* 50 (5-6), 567–575.
- Nishida, A., Yamamoto, T., Mukai, T., 1997. The Geotail Mission: principal characteristics and scientific results. *Adv. Space Res.* 20 (4/5), 539–548.

- Ogilvie, K., Chornay, D., Fritzenreiter, R., Hunsaker, F., Keller, J., Lobell, J., Miller, G., Scudder, J., Sittler, E. J., Torbert, R., Bodet, D., Needell, G., Lazarus, A., Steinberg, J., Tappan, J., Mavretic, A., Gergin, E., 1995. SWE, a comprehensive plasma instrument for the Wind spacecraft. *Space Sci. Rev.* 71, 41–54.
- Oieroset, M., Phan, T., Angelopoulos, V., Eastwood, J., McFadden, J., Larson, D., Carlson, C., Glassmeier, K.-H., Fujimoto, M., Raeder, J., 2008. THEMIS multi-spacecraft observations of magnetosheath plasma penetration deep into the dayside low-latitude magnetosphere for northward and strong IMF  $B_y$ . *Geophys. Res. Lett.* 35, L17S11.
- Onsager, T., Scudder, J., Lockwood, M., Russell, C., 2001. Reconnection at the high-latitude magnetopause during northward interplanetary magnetic field conditions. *J. Geophys. Res.* 106, 25467–25488.
- Paschmann, G., Baumjohann, W., Sckopke, N., Phan, T., Luhr, H., 1993. Structure of the dayside magnetopause for low magnetic shear. *J. Geophys. Res.* 98, 13409.
- Peredo, M., Slavin, J., Mazur, E., Curtis, S., 1995. Three-dimensional position and shape of the bow shock and their variation with Alfvénic, sonic and magnetosonic Mach numbers and interplanetary magnetic field orientation. *J. Geophys. Res.* 100, 7907–7916.
- Petrinec, S., Russell, C., 1993. An empirical model of the size and shape of the near-Earth magnetotail. *Geophys. Res. Lett.* 20, 2695.
- Petrinec, S., Russell, C., 1996. Near-Earth magnetotail shape and size as determined from the magnetopause flaring angle. *J. Geophys. Res.* 101, 137–152.
- Petrinec, S., Russell, C., 1997. A test of empirical magnetopause models during the CME event of January 10-11. spring 1997 American Geophysical Union poster.
- Petrinec, S., Song, P., Russell, C., 1991. Solar cycle variations in the size and shape of the near-Earth magnetotail. *J. Geophys. Res.* 96, 7893.
- Phan, T., Paschmann, G., 1996. Low latitude dayside magnetopause and boundary layer for high magnetic shear, 1. structure and motion. *J. Geophys. Res.* 101, 7801.
- Roelof, E., Sibeck, D., 1993. Magnetopause shape as a bivariate function of interplanetary magnetic field  $B_z$  and solar wind dynamic pressure. *J. Geophys. Res.* 98, 21421–21450.
- Russell, C., 1995. The structure of magnetopause, *in physics of the magnetopause*, edited by P. Song, B.U.O. Sonnerup, and M.F. Thomsen. *Geophys. Monograph* 90, 91–98.
- Russell, C., Elphic, C., 1978. Initial ISEE magnetometer results: Magnetopause observations. *Space Sci. Rev.* 22, 681.

- Safrankova, J., Dusik, S., Nemecek, Z., 2005. The shape and location of the high-latitude magnetopause. *Adv. Space Res.* 36 (10), 1934–1939.
- Safrankova, J., Nemecek, Z., Dusik, S., Prech, L., Sibeck, D., Borodkova, N., 2002. The magnetopause shape and location: a comparison of the Interball and Geotail observations with models. *Ann. Geophys.* 20 (3), 301–309.
- Safrankova, J., Nemecek, Z., Prech, L., Simunek, J., Sibeck, D., Sauvaud, J., 2007. Variations of the flank LLBL thickness as response to the solar wind dynamic pressure and IMF orientation. *J. Geophys. Res-Space Phys.* 112 (7), A07201.
- Safrankova, J., Zastenker, G., Fedorov, A., Nemecek, Z., Simersky, M., Prech, L., Vaisberg, O., Sharsko, Y., Romasenko, T., Leibov, A., Richter, ., Lesina, T., Plusina, N., Yanovskaja, N., 1997a. Omnidirectional plasma sensor VDP. Interball mission and payload.
- Safrankova, J., Zastenker, G., Nemecek, Z., Fedorov, A., Simersky, M., Prech, L., 1997b. Small scale observation of magnetopause motion: Preliminary results of the INTERBALL project. *Ann. Geophys.* 15 (5), 562–569.
- Sauvaud, J., Koperski, P., Beutier, T., Barthe, H., Aoustin, C., Thocaven, J., Rozaud, J., Penou, E., Vaisberg, O., Borodkova, N., 1997. The INTERBALL-Tail ELECTRON experiment: initial result on the low-latitude boundary layer of the dawn magnetosphere. *Ann. Geophys.* 15, 587–595.
- Scokpe, N., Paschmann, G., Haerendel, G., Sonnerup, B., Bame, S., Forbes, T., Hones, E., Russell, C., 1981. Structure of the low-latitude boundary layer. *J. Geophys. Res.* 86, 2099.
- Seon, J., Park, S., Min, K., Frank, L., Paterson, W., Ogilvie, K., 1999. Observations of density fluctuations in Earth's magnetosheath with Geotail and Wind spacecraft. *Geophys. Res. Lett.* 26, 959.
- Shue, J.-H., Chao, J., Fu, H., Khurana, K., Russell, C., Singer, H., Song, P., 1998. Magnetopause location under extreme solar wind conditions. *J. Geophys. Res.* 103, 17691.
- Shue, J.-H., Chao, J., Fu, H., Russell, C., Song, P., Khurana, K., Singer, H., 1997. A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape. *J. Geophys. Res.* 102, 9497–9511.
- Sibeck, D., Baumjohann, W., Elphic, R., Fairfield, D., Fennell, J., 1989. The magnetospheric response to 8-minute-period strong-amplitude upstream pressure variations. *J. Geophys. Res.* 94, 2505.
- Sibeck, D., Lopes, R., Roelof, E., 1991. Solar wind control of the magnetopause shape, location and motion. *J. Geophys. Res.* 95, 5489–5495.

- Sibeck, D., Prech, L., Safrankova, J., Nemecek, Z., 2000. Two-point measurements of the magnetopause: Interball observations. *J. Geophys. Res-Space Phys.* 105 (A1), 237–244.
- Smith, C., L’Heureux, J., Ness, N., Acuna, M., Burlaga, L., Scheifele, L., 1998. The ACE Magnetic Field Experiment. *Space Sci. Rev.* 86, 613–632.
- Song, P., Elphic, R., Russell, C., Gosling, J., Cattell, C., 1990a. Structure and properties of the subsolar magnetopause for northward IMF: ISEE observations. *J. Geophys. Res.* 95, 6357–6387.
- Song, P., Russell, C., 1992. Model of the formation of the low/latitude boundary layer for strongly northward interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.* 97, 1411–1420.
- Song, P., Russell, C., Fitzenreiter, R., Gosling, J., Thomsen, M., Mitchell, D., Fuselier, S., Parks, G., Anderson, R., Hubert, D., 1993. Structure and properties of the subsolar magnetopause for northward interplanetary magnetic field: Multiple-instrument particle observations. *J. Geophys. Res.* 98, 11319–11337.
- Song, P., Russell, C., Gosling, J., Thomsen, M., Elphic, R., 1990b. Observations of the density profile in the magnetosheath near the stagnation streamline. *Geophys. Res. Lett.* 17, 2035.
- Sotirelis, T., Meng, C.-I., 1999. Magnetopause from pressure balance. *J. Geophys. Res.* 104, 6889–6898.
- Southwood, B., Kivelson, M., 1992. On the form of the flow in the magnetosheath. *J. Geophys. Res.* 97, 2873.
- Spreiter, J., Summers, A., Alksne, A., 1966. Hydromagnetic flow around the magnetosphere. *Planet Space Sci.* 14, 223.
- Suvorova, A., Shue, J.-H., Dmitriev, A., Sibeck, D., McFadden, J., Hasegawa, H., Ackerson, K., Jelinek, K., Safrankova, J., Nemecek, Z., 2010. Magnetopause expansions for quasi-radial interplanetary magnetic field: THEMIS and Geotail observations. *J. Geophys. Res.* In press.
- Tkachenko, O., Dusik, S., Safrankova, J., Nemecek, Z., 2010. Spatial profile of the LLBL: Multispacecraft Themis observations. *AIP Conf. Proc.* 1216, 487–490.
- Tsyganenko, N., 1996. Effects of the solar wind conditions on the global magnetospheric configuration as deduced from data-based field models. In *Proceedings of Third International Conference on Substorms (ICS-3)*. Eur. Space Agency Spec. Publ. ESA SP-389, 181.

- Vaisberg, O., Smirnov, V., Avakov, L., Waite, J., Burch, J., Gallagher, D., Borodkova, N., 2001. Different types of low-latitude boundary layer as observed by Interball Tail probe. *J. Geophys. Res.* 106, 13067–13090.
- Yermolayev, Y., Fedorov, A., Vaisberg, O., Balebanov, V., Obod, Y., Jimenez, R., Fleites, J., Llera, L., Omelchenko, A., 1997. Ion distribution dynamics near Earth's bow shock: first measurements with 2D ion energy spectrometer CORALL on the INTERBALL/Tail-probe satellite. *Ann. Geophys.* 15, 533–541.
- Zelenyi, L., Sauvaud, J., 1997. Interball-1: first scientific results. *Ann. Geophys.* 15, 5.
- Zwan, B., Wolf, R., 1976. Depletion of the solar wind plasma near a planetary boundary. *J. Geophys. Res.* 81, 1636.

## Prílohy

## A Často používané skratky

FTE	Flux Transfer Event
GSE	Geocentric Solar Ecliptic
GSM	Geocentric Solar Magnetic
IB	Družica Interball-1
IMF	Interplanetary Magnetic Field
KHI	Kelvin-Helmholtz Instability
LLBL	Low Latitude Boundary Layer
MSBL	Magnetosheath Boundary Layer
MSH	Magnetosheath
PDL	Plasma Depletion Layer
PS	Plasmasheet
PSBL	Plasma Sheet Boundary Layer
SW	Solar Wind
THA až THE	Družice Themis A až Themis E
TP	Transition Parameter
UT	Universal Time

## B Slovníček pojmů

bow shock	rázová vlna
cone angle	uhol medzi vektormi IMF a rýchlosťou slnečného vetra
cuspl	kasp
current sheet	prúdová vrstva
dawn	ranná oblasť
dayside	denná strana
dusk	večerná oblasť
interplanetary magnetic field	medziplanetárne magnetické pole
field aligned current	prúd zarovnaný s poľom
flank	chvost, chvostová oblasť
flux	tok
ionosphere	ionosféra
latitude	geomagnetická šírka
low-latitude boundary layer	hraničná vrstva v nízkych šírkach
magnetic shear	magnetický strih
magnetopause	magnetopauza
magnetopause current	prúd na magnetopauze
magnetosheath	prechodová oblasť
magnetosphere	magnetosféra
magnetotail	magnetický chvost
nightside	nočná strana
pitch angle	uhol ktorý zvierá vektor rýchlosti častice s vekt. magn. poľa
plasma sheet	plazmová vrstva
plasma mantle	plazmový plášť
reconnection	prepojenie
ring current	kruhový prúd
solar wind	slnečný vietor
subsolar	prisľnečný
subsolar point	prisľnečný bod
sunward	smerom k Slnku
tailward	smerom k chvostu
terminator	prechod medzi dennou a nočnou stranou
tilt angle	uhol sklonu dipólovej osy
upstream parameters	parametre slnečného vetra



## C Priložené články

### C1

Safrankova, J., Nemecek, Z., **Dusik, S.**, Prech, L., Sibeck, D.G., Borodkova, N.N., 2002. The magnetopause shape and location: a comparison of the Interball and Geotail observations with models. *Ann. Geophys.* 20, 301–309.

### C2

**Dusik, S.**, Safrankova, J., Nemecek, Z., 2003. A statistical study of low-latitude magnetopause crossings. *WDS'03 Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media*. Matfyzpress, Prague, 254–260.

### C3

Safrankova, J., **Dusik, S.**, Nemecek, Z., 2005. The shape and location of the high-latitude magnetopause. *Adv. Space Res.* 36, 1934–1939.

### C4

**Dusik, S.**, Safrankova, J., Nemecek, Z., 2007. A Study of the LLBL Profile Using n-T Plots. *WDS'07 Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media*. Matfyzpress, Prague, 42–49.

### C5

Tkachenko, O., **Dusik, S.**, Safrankova, J., Nemecek, Z., 2010. Spatial Profile of the LLBL: Multispacecraft Themis observations *AIP Conf. Proc.*, 1216: 487–490.

### C6

**Dusik, S.**, Granko, G., Safrankova, J., Nemecek, Z., Jelinek, K., 2010. IMF cone angle control of the magnetopause location: Statistical study. *Geophys. Res. Lett.*, Odoslané do tlače.



**C1 - Safrankova et al. (2002)**

Safrankova, J., Nemecek, Z., **Dusik, S.**, Prech, L., Sibeck, D.G., Borodkova, N.N., 2002. The magnetopause shape and location: a comparison of the Interball and Geotail observations with models. *Ann. Geophys.* 20, 301–309.



**C2 - Dusik et al. (2003)**

**Dusik, S.**, Safrankova, J., Nemecek, Z., 2003. A statistical study of low-latitude magnetopause crossings. WDS'03 Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media. Matfyzpress, Prague, 254–260.



**C3 - Safrankova et al. (2005)**

Safrankova, J., **Dusik, S.**, Nemecek, Z., 2005. The shape and location of the high-latitude magnetopause. *Adv. Space Res.* 36, 1934–1939.





**C4 - Dusik et al. (2007)**

**Dusik, S.**, Safrankova, J., Nemecek, Z., 2007. A Study of the LLBL Profile Using n-T Plots. WDS'07 Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media. Matfyzpress, Prague, 42–49.



**C5 - Tkachenko et al. (2010)**

Tkachenko, O., **Dusik, S.**, Safrankova, J., Nemecek, Z., 2010. Spatial Profile of the LLBL: Multispacecraft Themis observations AIP Conf. Proc., 1216: 487–490.



**C6 - Dusik et al. (2010)**

**Dusik, S.**, Granko, G., Safrankova, J., Nemecek, Z., Jelinek, K., 2010. IMF cone angle control of the magnetopause location: Statistical study. *Geophys. Res. Lett.*, Odsané do tlače.

